

Bewertung von Unsicherheiten radarinterferometrisch detektierter vertikaler Bodenbewegungen in Folge des Grubenwasseranstiegs im ehemaligen Steinkohlenrevier Oelsnitz/E.

Andrè John, Karl-Heinz Löbel

TU Bergakademie Freiberg - Institut für Markscheidewesen und Geodäsie

ZUSAMMENFASSUNG:

Das Institut für Markscheidewesen und Geodäsie der TU Bergakademie Freiberg beschäftigt sich bereits seit vielen Jahren mit der Analyse und dem Monitoring der vertikalen Bodenbewegungen im ehemaligen Steinkohlerevier Oelsnitz/Erzgebirge. Aktuelle Bestrebungen gehen dahin, die Potentiale der Radarinterferometrie zur Detektion vertikaler Bodenbewegungen bestmöglich auszunutzen um zukünftig, im Vergleich zu Nivellement Messungen in großen zeitlichen Abständen, auch zeitlich besser aufgelöste Aussagen zur Bewegungsdynamik zu erhalten.

Nach einer grundsätzlichen Darstellung des Ablaufs einer PSI-Analyse unter Nutzung weitgehend freier Softwarelösungen, werden am Beispiel des Oelsnitzer Reviers verschiedene aus der Anwendung des Verfahrens resultierende praktische Fragestellungen analysiert.

ABSTRACT:

The Institute for Mine Surveying and Geodesy of the TU Bergakademie Freiberg has been working for many years on the analysis and monitoring of vertical ground movements in the former coal mine area Oelsnitz/Erzgebirge. Recent efforts are aimed at making the best possible use of the potentials of radar interferometry for the detection of these vertical ground movements. In the future, for example, it would be possible to obtain temporally better-resolved statements on the dynamics of ground movements in comparison to levelling measurements at long time intervals.

After a general presentation of the workflow of a PSI analysis using widely free software solutions, various practical questions resulting from the application of the method are analyzed using the example of the former mining area Oelsnitz/Erzgebirge.

1 Einleitung

Die aktive Bergbauphase im Steinkohlenrevier Oelsnitz/E. dauerte von ca. 1850 bis in das Jahr 1974, wobei die Flutung des Reviers bereits zu Beginn der 1970er Jahre gestartet wurde und noch heute läuft. 1976 wurde durch den Markscheider Bayer ein Grubenwasseranstieg bis etwa in das Jahr 2030 prognostiziert. Nach erheblichen Bodensenkungen in der aktiven Bergbauphase haben wir aktuell Hebungserscheinungen an der Erdoberfläche aufgrund des Grubenwasseranstiegs. Dabei ist die geringe Geschwindigkeit des Grubenwasseranstiegs und die daraus resultierenden geringen Bodenbewegungsraten, eine Besonderheit im Oelsnitzer Revier.

In der aktiven Bergbauphase wurden die auftretenden Bodensenkungen mit Hilfe von Nivellement-Messungen an ca. 500 Punkten im Zweijahres-Intervall erfasst. In der Nachbergbauphase wurden dann in den Jahren 96/97 sowie 2002, 2006 und 2014 Nivellement-Messungen an ca. 50 ausgesuchten Punkten des ehemaligen Revier-Nivellement-Netzes durchgeführt. Aktuell gehen die Bestrebungen dahin, zukünftig die Potentiale der Radarinterferometrie für das Monitoring der Bodenbewegungen auszuschöpfen.

1.1 Grubenwasseranstieg

Der Grubenwasseranstieg wurde nach der Schließung des Bergwerks zunächst nicht überwacht. Erst 2004 wurde begonnen eine bestehende Tiefbohrung im Stadtbereich Oelsnitz zu einer Grubenwassermessstelle (GRWM 1) auszubauen. Im Jahr 2014 wurde dann noch eine weitere Grubenwassermessstelle (GRWM 2) im Ortsbereich Gersdorf im Norden des Reviers eingerichtet. Darüber hinaus befinden sich im Nord-Osten der Grubenwassermessstelle (GRWM 2) drei weitere Grundwassermessstellen (Bernsdorf, Lichtenstein, Mülsen), deren Pegel ein sehr ähnliches Verhalten (hohe Korrelation) zeigen.

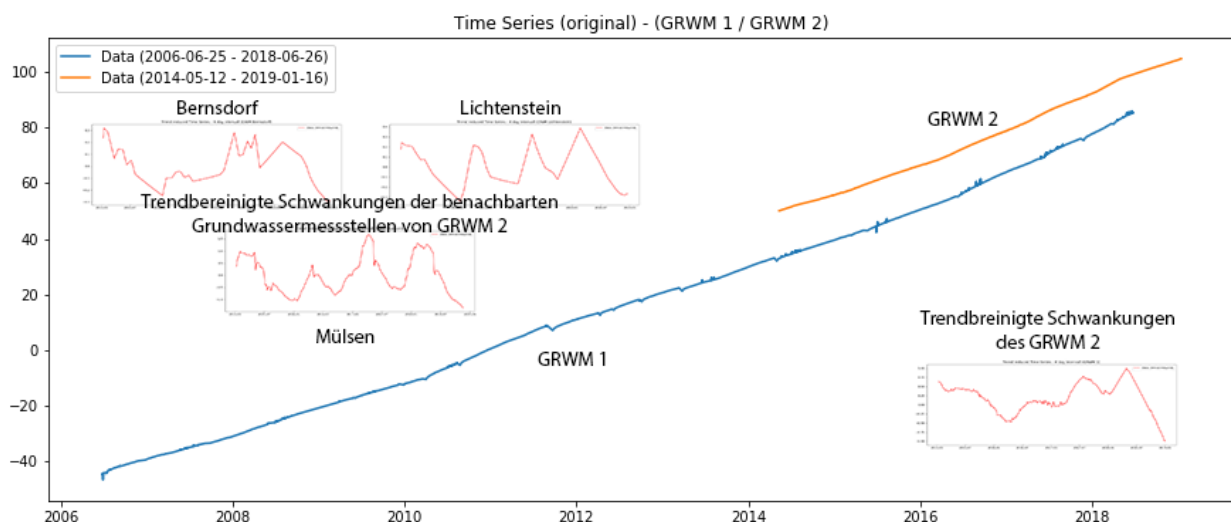


Abb. 1: verfügbare Pegeldata der Grubenwassermessstellen GRWM 1 (25.06.2006 - 26.06.2018) und GRWM 2 (12.05.2014 - 16.01.2019) sowie Darstellung der trendbereinigten Schwankungen für GRWM 2 und deren benachbarte Grundwassermessstellen

Die entsprechenden Pegeldaten sind über das Umweltportal Sachsen – iDA¹⁴ des Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie frei zugänglich. Für eine Analyse der Zusammenhänge von Grundwasser- und Grubenwasserpegelschwankungen wurden für alle Messstellen die trendbereinigten residualen Schwankungen ermittelt (s. Abb. 1).

Anschließend wurde die Korrelation unter Berücksichtigung einer zeitlichen Verschiebung für die mittlere Pegelschwankung der 3 Grundwassermessstellen und der Schwankungen in der Grubenwassermessstelle GRWM2 analysiert. Die Abb. 2 zeigt das Ergebnis dieser Untersuchung. Demnach zeigt sich, dass Schwankungen in den Grundwassermessstellen mit einer zeitlichen Verzögerung von ca. 2-3 Monaten mit den Schwankungen des Grubenwasserpegels (GRWM 2) korreliert ($\rho > 0.75$) sind.

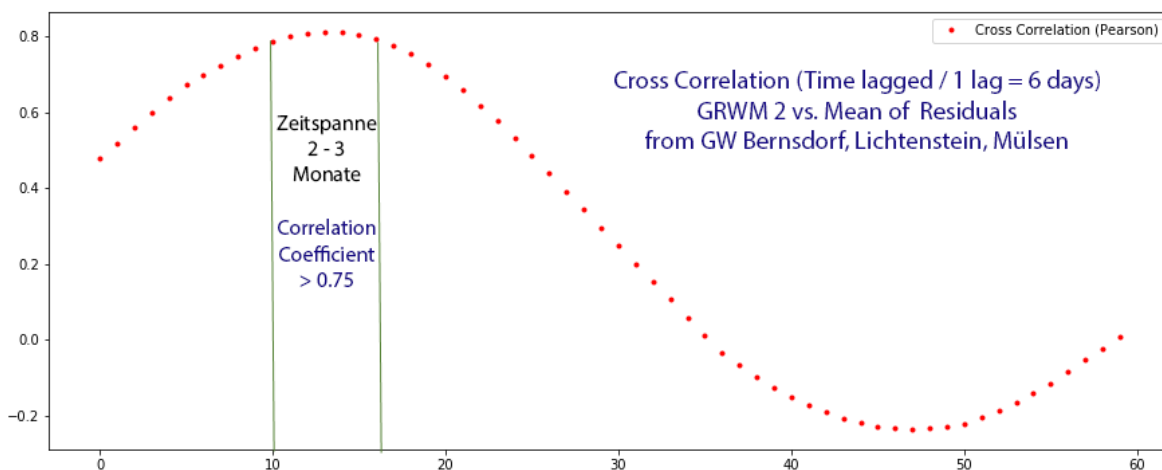


Abb. 2: Korrelation der Pegelschwankungen von GRWM 2 und der mittleren Schwankungen der benachbarten Grundwassermessstellen (Bernsdorf, Lichtenstein, Mülsen) unter Berücksichtigung einer zeitlichen Verschiebung

2 Resümee der Monitoring-Ergebnisse von 1996/97 bis 2018

Die erste teilweise Wiederholung des Reviernivellements wurde in den Jahren 1996/97 durchgeführt. Danach folgten 2002, 2006 und 2014 weitere Messungen mittels Nivellements. Die Beobachtungen bis 2006 wurden unter vergleichbaren Anschlussbedingungen ausgeglichen und in Isolindarstellungen zusammengefasst, die in [16] veröffentlicht wurden. Die Abb. 3 bis Abb. 5 geben diese nochmals wieder, wobei die absichtlich im Datensatz belassenen offensichtlichen Ausreißer (Abb. 3) mit einer korrigierten „0-Linie“ ergänzt sind. Die Flächen innerhalb der blauen Strichlinie kennzeichnen den Bereich mit einer mittleren Hebungsrate pro Jahr von "mv" ≥ 1 mm. Diese Linien sind pauschal in die Abb. 4 und Abb. 6 übernommen, so dass die Entwicklung des Hebungsgebietes von Nord-West nach Süd-Ost deutlich wird. Generell bestätigt die Darstellung in Abbildung 6 diese Tendenz. Die Nivellements 2014 sind aber wahrscheinlich mit anderen Anschlüssen ausgeglichen. Die Gründe für die in den Abb. 7 und Abb. 8 dargestellten scheinbar widersprüchlichen Interpolationsergebnisse aus den linearen Trends für die mittlere Hebungsrate pro Jahr (mv) werden in Abschnitt 3 näher erläutert. Die Abb. 9 bis Abb. 12 dokumentieren die zunächst sehr simple

¹⁴ iDA – Umweltportal Sachsen: <https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/wasser/13554.htm>

Auswertestrategie, die für zuverlässig mit Nivellement-Messungen verifizierbare Ergebnisse weiterentwickelt werden muss.



Abb. 3: Vertikale Bodenbewegungen im Zeitraum von 1974 bis 1996 (22 Jahre) [16]



Abb. 4: Vertikale Bodenbewegungen im Zeitraum von 1996 bis 2002 (6 Jahre) [16]



Abb. 5: Vertikale Bodenbewegungen im Zeitraum von 2002 bis 2006 (4 Jahre) [16]



Abb. 6: Vertikale Bodenbewegungen im Zeitraum von 2006 bis 2014 in mm/Jahr (8 Jahre)

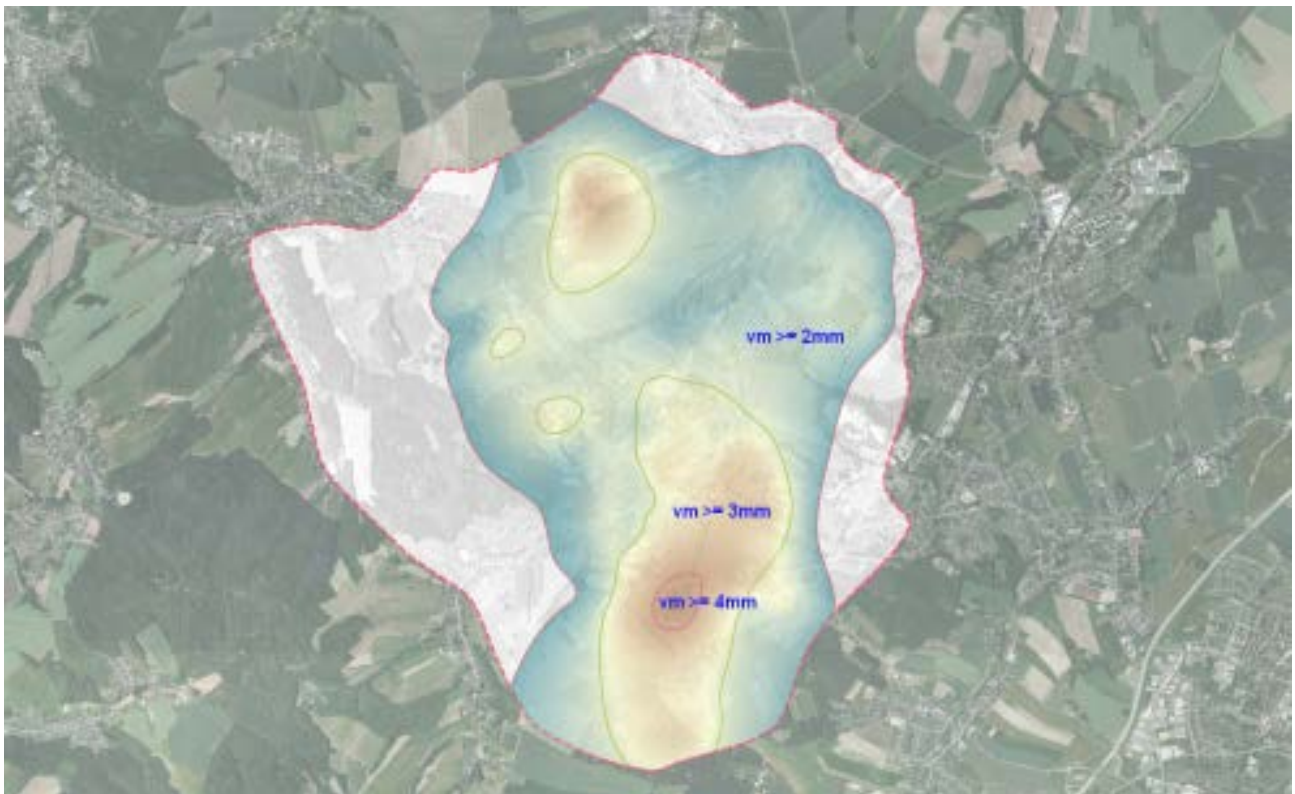


Abb. 7: Hebungen pro Jahr aus PSI-Zeitreihe im Zeitraum von 2015 bis 2017 (3 Jahre) [12]

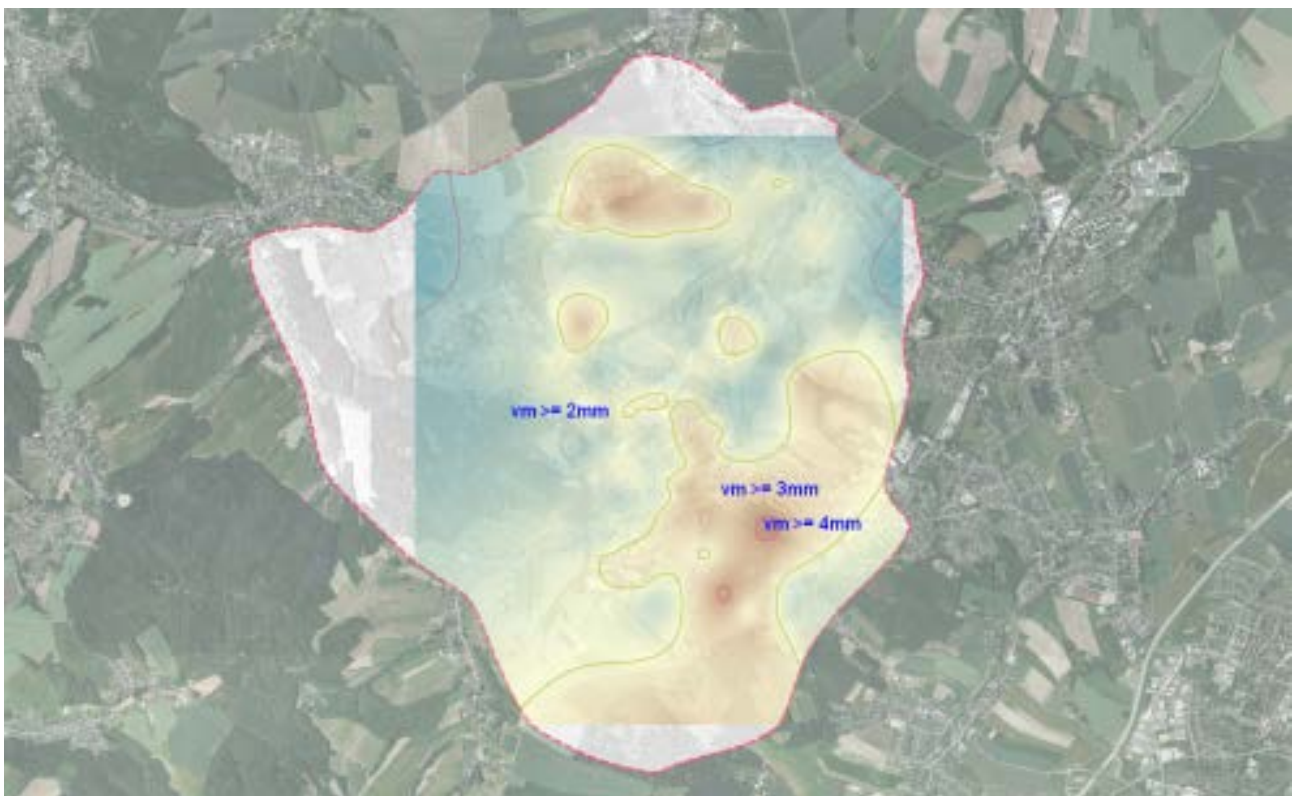


Abb. 8: Hebungen pro Jahr aus PSI-Zeitreihe im Zeitraum von 2015 bis 2018 (4 Jahre)

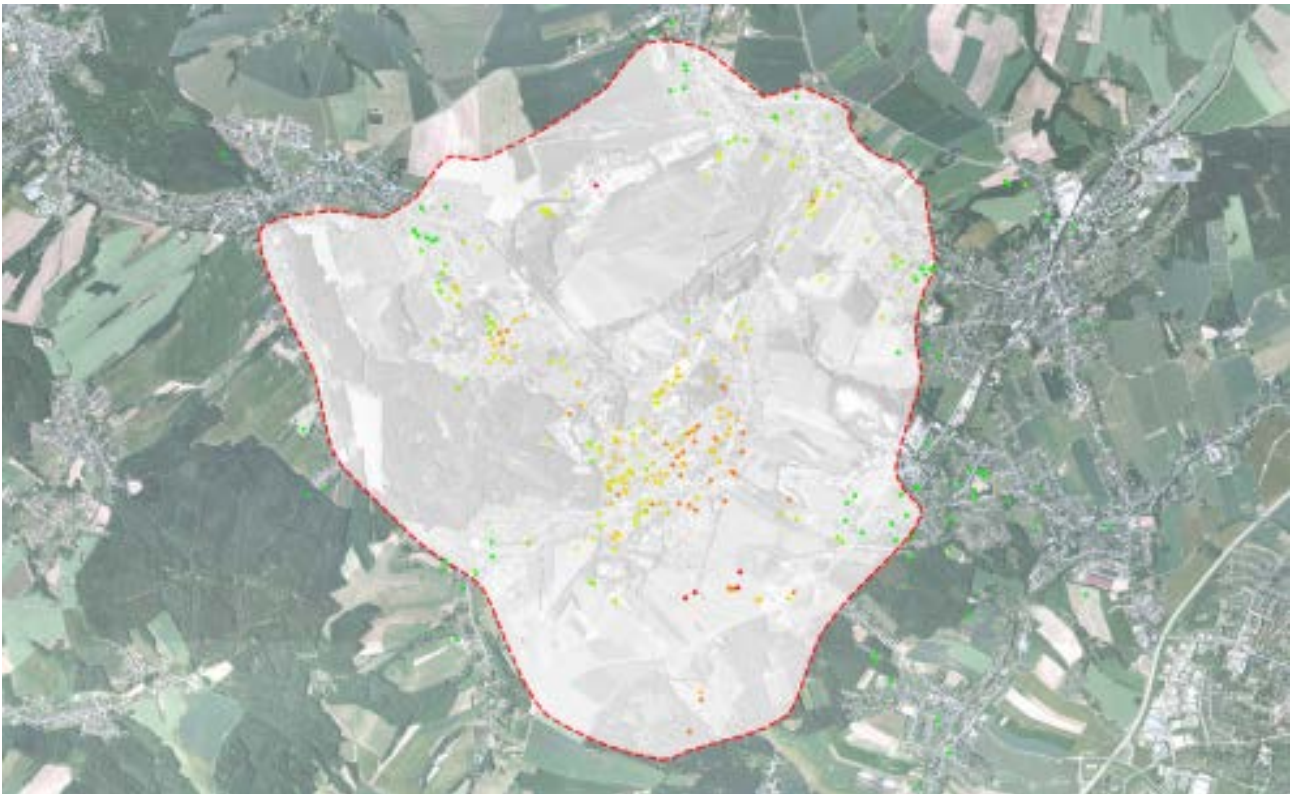


Abb. 9: Selektion von Punkten der Zeitreihe 2015-2017 mit der Bedingung
"coh_ps" ≥ 0.92 AND "mv" ≥ 2

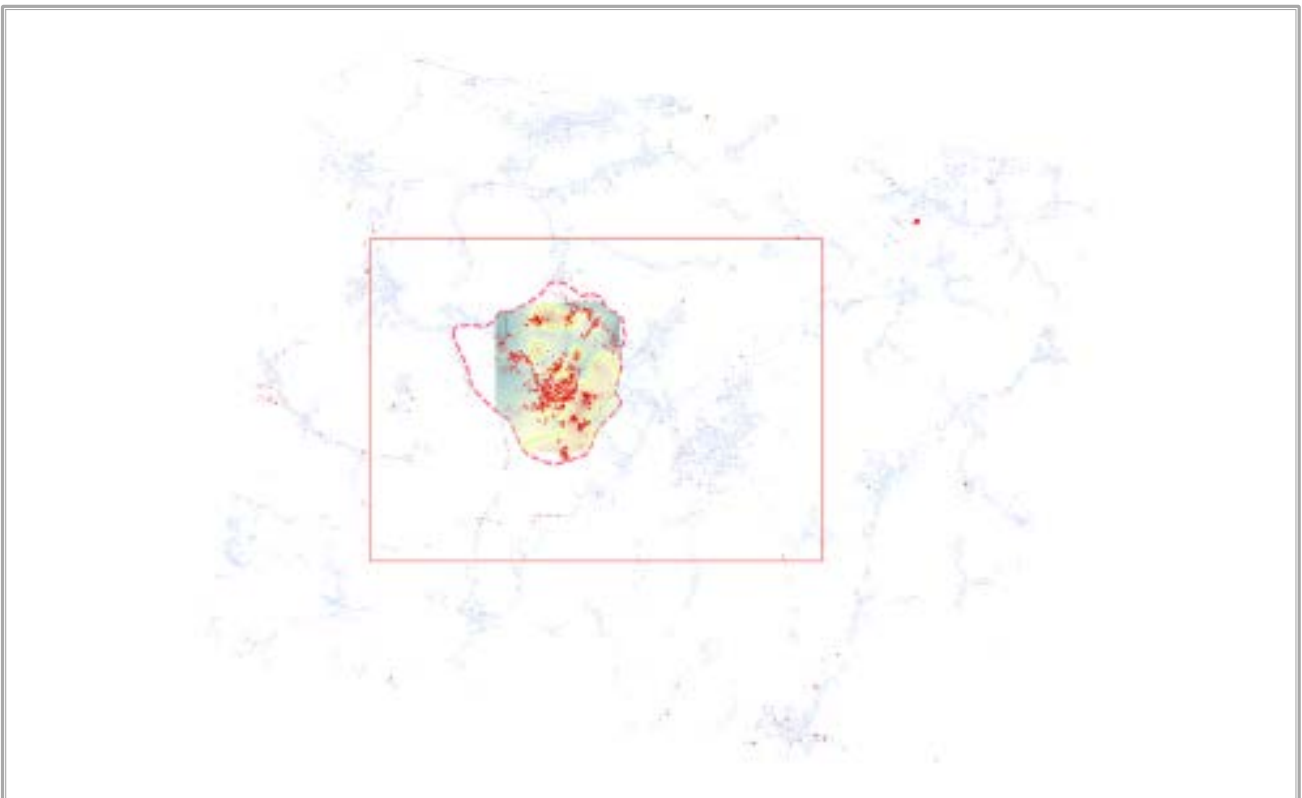


Abb. 10: Selektion von Punkten der Zeitreihe 2015-2018 mit der Bedingung
"coh_ps" ≥ 0.98 AND "mv" ≥ 0

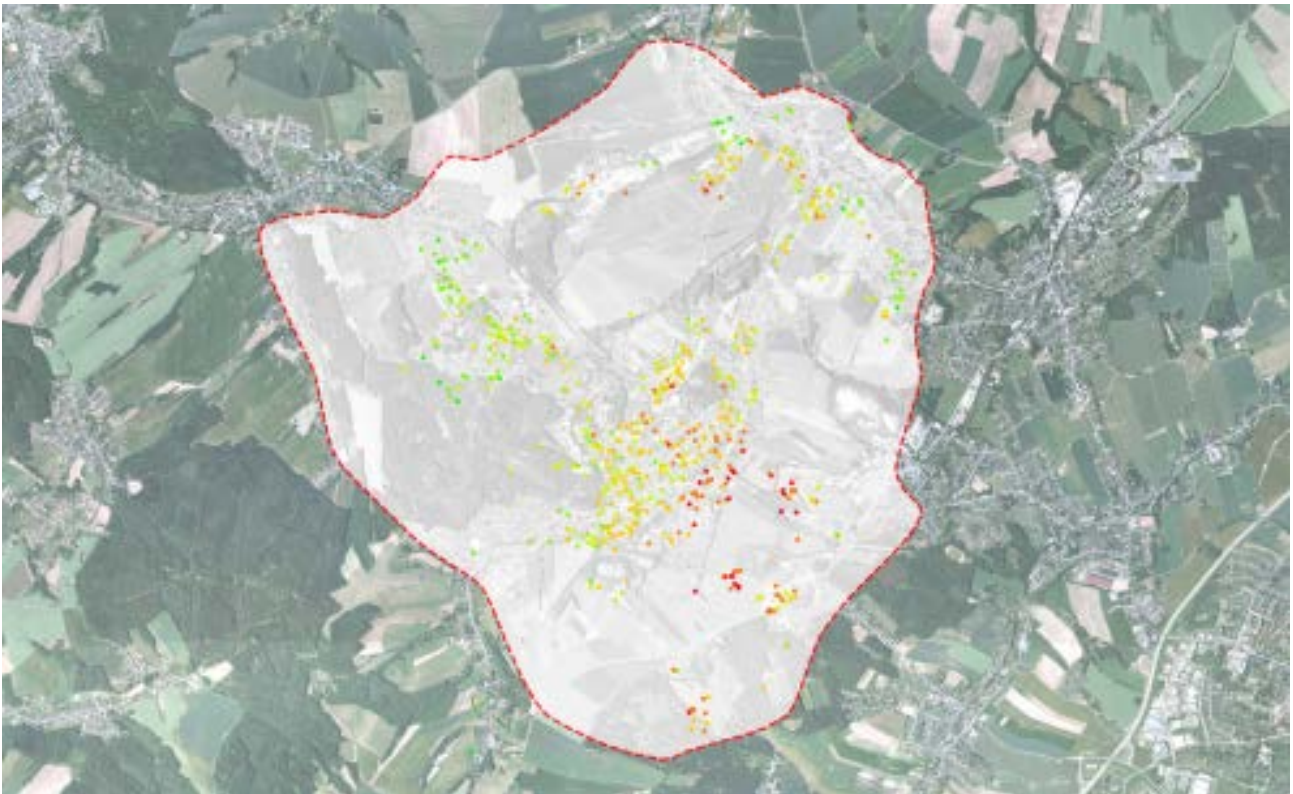


Abb. 11: Selektion von Punkten der Zeitreihe 2015-2018 mit der Bedingung
"coh_ps" ≥ 0.92 AND "mv" ≥ 1.5

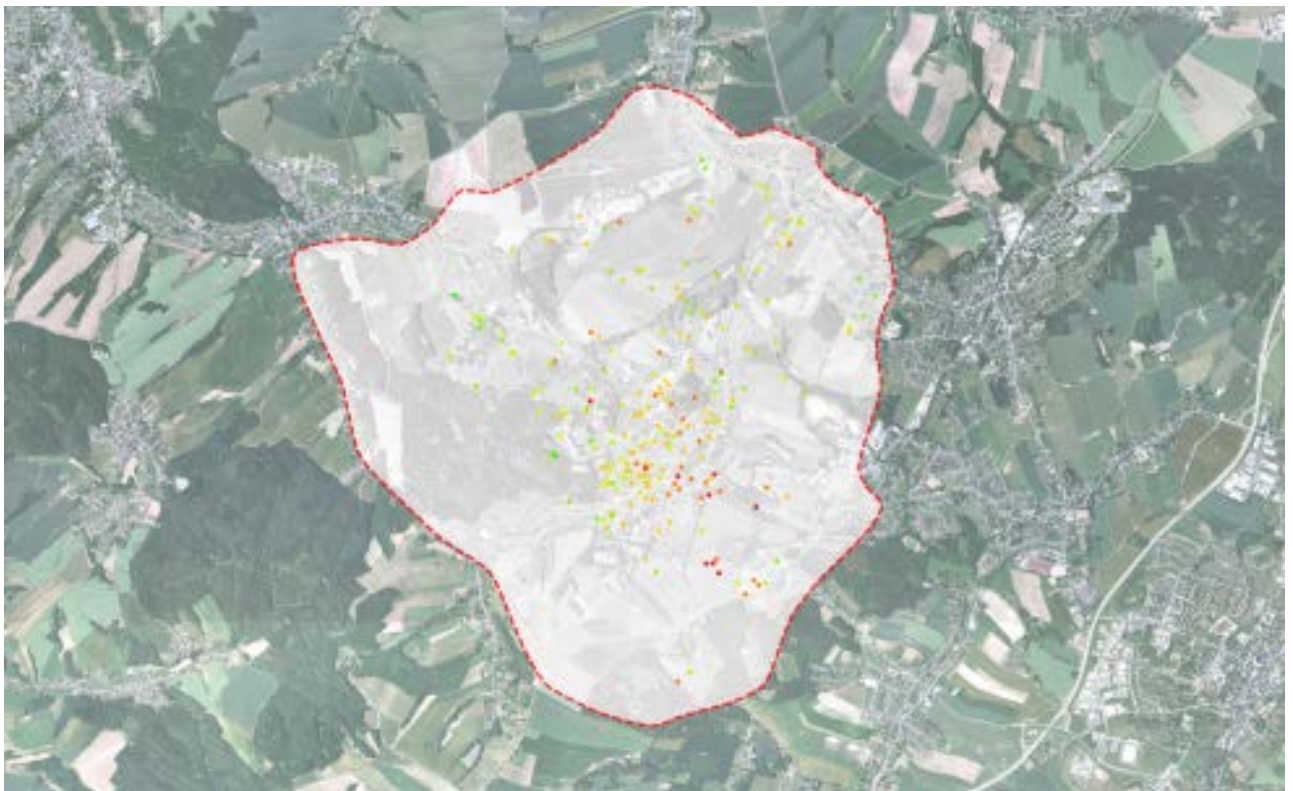


Abb. 12: Ausdünnung der Punktwolke mit der Bedingung nahe Nachbarschaft und
Differenz "mv" ≥ 0.5

3 PSI-Radardaten Auswertung mit SNAP¹⁷ und STaMPS¹⁵

Für eine kontinuierliche vermessungstechnische Überwachung der Hebungsprozesse im Oelsnitzer Revier werden frei verfügbare Radardaten des Copernicus-Programms (Sentinel-1 a/b) ausgewertet. Die im Copernicus-Programm verwendeten Radarsensoren sind sogenannte SAR-Systeme (Synthetic Aperture Radar). Eine Einführung in die Grundlagen dieser Systeme wird z.B. durch M. Skolnik [1] [2] gegeben. Für die Auswertung dieser Radardaten wird die sogenannte Radarinterferometrie verwendet, welche die Bestimmung von Bodenbewegungen in Richtung des Sensors ermöglicht. Eine umfassende Einführung in die theoretischen Grundlagen der radarinterferometrischen Auswertung wird z. B. durch R. Hanssen [3] gegeben. Der Begriff Radarinterferometrie ist dabei nur ein Synonym für eine ganze Reihe von methodischen Ansätzen zur interferometrischen Auswertung von Radardaten. Abhängig von der Anwendung und dem Zweck der Auswertung werden verschiedene Methoden angewendet. Für die Analyse von Bodenbewegungen über längere Zeiträume hinweg, bietet sich eine Auswertung mit der so genannten „persistent scatterer interferometry“ (PSI-Methode) [4] [5] an. Bei der PSI-Methode werden lange Zeitreihen von SAR-Szenen berücksichtigt, indem die zeitliche Veränderung der Phase von stabilen Punktstreuern betrachtet wird. Unter stabilen Punktstreuern versteht man dabei Punkte die immer in ähnlicher Weise rückstreuen und eine Auflösungszelle (ein Pixel) dominieren. Diese sogenannten „Persistent Scatterer“ (PS) mit stabilen Rückstreuungseigenschaften können z. B. Bauwerke, Verkehrswege, Strommasten o. ä. Objekte sein. Daher eignen sich PSI-Methoden besonders zur Überwachung von Bodenbewegungen in urbanen Gebieten. In der Literatur ist eine große Auswahl verschiedener Variationen des PSI-Verfahrens zu finden. Ein guter Überblick über die verschiedenen Entwicklungen ist in Crosetto et al. [6] zu finden. Für die Auswertung im Oelsnitzer Revier wurde der Ansatz von Hooper et al. [7] verwendet, da dieser die Grundlage des frei verfügbaren PSI-Softwarepakets StaMPS¹⁵ [8] [9] bildet. Dieser Ansatz verwendet eine Methode zur Selektion der PS-Punkte unter Verwendung von Phaseneigenschaften, die geeignet ist, natürliche Ziele mit niedriger Amplitude mit Phasenstabilität zu finden, die durch amplitudenbasierte Algorithmen nicht identifiziert werden können. StaMPS¹⁵ ist jedoch keine eigenständige Software, sondern eine Sammlung von Skripten, welche eine bestehende Matlab¹⁶-Installation erfordert.

Neben der Software STaMPS (Matlab) kommt für die Vorverarbeitung der Radardaten die frei verfügbare Sentinel Application Platform (SNAP¹⁷) der European Space Agency (ESA) zum Einsatz. Die grundsätzlich notwendigen Vorverarbeitungsschritte vor der Prozessierung mit Hilfe der Software STaMPS können wie folgt zusammengefasst werden:

- **Abspaltung eines Teilbereichs (Sub-Swath [IW1, IW2, IW3] und Bursts [1-9])** aus den Rohdaten in Abhängigkeit der Lage des interessierenden Untersuchungsgebietes. Sollte sich das Untersuchungsgebiet über mehrere Teilstreifen (Sub-Swaths) erstrecken, dann ist zunächst eine getrennte Vorverarbeitung aller relevanten Teilstreifen notwendig.

¹⁵ StaMPS/MTI - <https://homepages.see.leeds.ac.uk/~earahoo/stamps/>

¹⁶ MATLAB - <https://de.mathworks.com/products/matlab.html>

¹⁷ SNAP (Sentinel Application Platform) - <http://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>

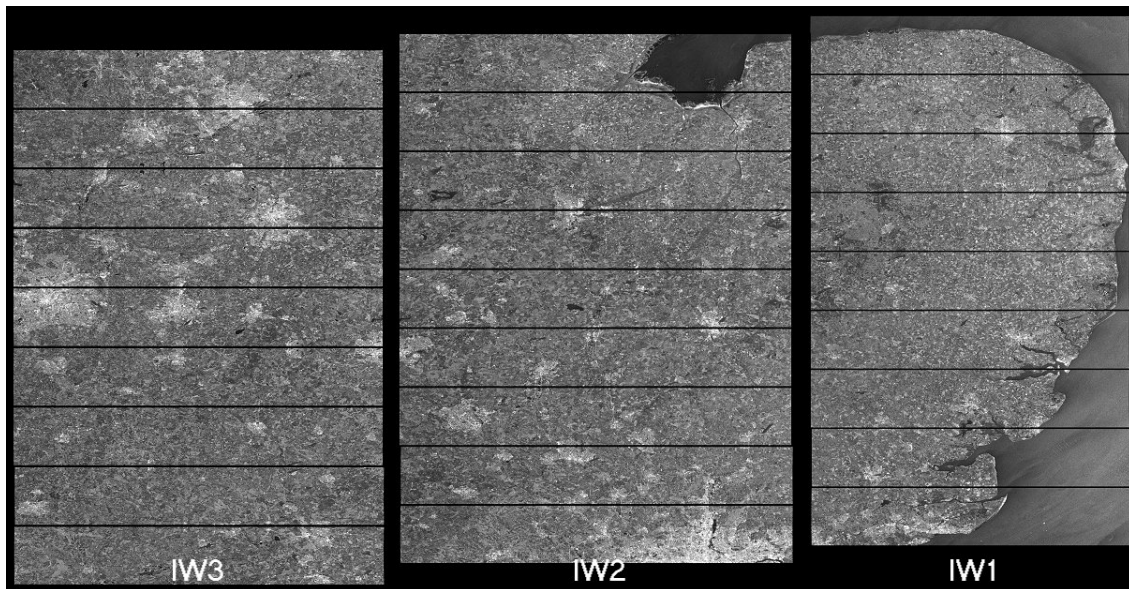


Abb. 13: Struktur einer Sentinel-1 Aufnahme (IW Mode) mit Aufteilung in Sub-Swaths und Bursts (Quelle: ESA Webseite)

- **Zuweisung präziser Orbitdaten** (Apply Orbit File): Die in den Metadaten eines SAR-Produkts bereitgestellten Orbitdaten (Informationen zur Position und Geschwindigkeit des Satelliten) sind im Allgemeinen nicht genau. Sie können jedoch durch präzise Orbitdaten verbessert werden, die Tage bis Wochen nach der Erzeugung des Produkts verfügbar sind.
- **Ko-Registrierung** (Coregistration): Um die Phasenverschiebung zwischen SAR-Aufnahmen radarinterferometrisch auswerten zu können, ist eine exakte Ko-Registrierung erforderlich, damit in allen Aufnahmen die Rückstreuung von den gleichen Objekten pro Pixel verglichen wird.
- **Deburst und Merge**: Sentinel1 IW SLC-Produkte bestehen aus mehreren Bursts, die sich in der Azimutrichtung für jeden Teilstreifen (Sub-Swath) überlappen und durch schwarze Linien getrennt sind (s. Abb. 13). Die Operation besteht darin, ein kontinuierliches Bild in Bezug auf die Azimutrichtung zu erzeugen, indem schwarze Trennlinien sowie redundante Linien zwischen Bursts entfernt werden.
- **Ermittlung einer optimalen Master-Aufnahme** (Optimal InSAR Master Selection): PSI-Verfahren verwenden große Stapel von SAR-Aufnahmen, um viele Einzelpaar-Interferogramme in Bezug auf eine Master-Aufnahme zu erzeugen, um so die Verschiebungshistorie von Objekten zu erfassen. Die Auswahl der optimalen Master-Aufnahme basiert dabei auf einer Schätzung der erwarteten Kohärenz. Die Master-Aufnahme wird so ausgewählt, dass die erwartete Kohärenz des Stapels maximiert wird. Alle anderen verwendeten Aufnahmen werden als Slave-Aufnahmen bezeichnet.
- **Berechnung der differentiellen Interferogramme** (Interferogram Formation): Berechnung von (komplexen) Interferogrammen zwischen der Master-Aufnahme und allen Slave-Aufnahmen und Subtraktion der Phasenanteile der „flachen Erde“ und der „Topographie“. Der „flache Erde“ Anteil ist der im interferometrischen Signal aufgrund der Krümmung der

Referenzfläche vorhandene Phasenanteil. Für die Bestimmung des topographischen Phasenanteils ist zusätzlich ein digitales Höhenmodell (DEM), wie z. B. *SRTM 1sec* notwendig.

- **Optional: Weitere Beschneidung der Daten auf ein Teilgebiet** (Subsetting)
- **STaMPS Export:** Der STaMPS-Export überführt die vorverarbeiteten Daten (koregistrierte Stapel, differentielle Interferogramme und Höheninformationen) in ein für die STaMPS-Software lesbares Format (Gamma Formatted Data).
- **Vorbereitung der Daten für Matlab:** Der letzte Schritt vor der PSI-Analyse mit STaMPS ist die Vorbereitung der Daten für die Verwendung in Matlab, sowie die Identifikation der „Persistent Scatterer“ Kandidaten. Beides erfolgt mit Hilfe des von A. Hooper bereitgestellten Skriptes „mt_prep_snap“, welches Bestandteil des STaMPS-Pakets ist.

Anschließend erfolgt die PSI-Auswertung mit der Software STaMPS. Diese beinhaltet die folgenden Teilschritte:

- **Schritt 1 - Laden der identifizierten „Persistent Scatterer“ Kandidaten**
- **Schritt 2 - Berechnung der zeitlichen Kohärenz** durch Schätzung des Phasenrauschens und Berechnung eines räumlich-unkorrelierten Blickwinkelfehlers [SULA Error].
- **Schritt 3 - Auswahl geeigneter „Persistent Scatterer“,** d. h. Pixel werden aufgrund ihrer Rauscheigenschaften ausgewählt.
- **Schritt 4 - Bereinigung der „Persistent Scatterer“:** Pixel, die im vorherigen Schritt ausgewählt wurden, werden bereinigt, wodurch diejenigen gelöscht werden, die auf dem Signalbeitrag benachbarter Bodenauflösungselemente und auf zu verrauschte Pixel zurückzuführen sind.
- **Schritt 5 - Phasenkorrektur:** Die nicht-abgewickelte (wrapped) Phase der ausgewählten Pixel wird um den räumlich-unkorrelierten Blickwinkelfehler [SULA Error] aus Schritt 3 korrigiert.
- **Schritt 6 - Phasenabwicklung (phase unwrapping):** Eliminierung der Phasensprünge (Diskontinuitäten) in der extrahierten Phase aufgrund des Wertebereichs von $-\pi$ bis π und Rekonstruktion der Phase im ursprünglichen Wertebereich. [Falls Schritt 6 nach einem vollständigen STaMPS-Lauf erneut ausgeführt wird, werden die Schätzungen der SCLA-, der Master-Atmosphäre und des Orbit-Fehlers (AOE) aus Schritt 7 vor dem Abwickeln (unwrapping) abgezogen.]
- **Schritt 7 - Schätzung des räumlich korrelierten Blickwinkelfehlers [SCLA Error]:** Berechnung eines räumlich-korrelierter Blickwinkelfehlers (SCLA-Fehler), der fast ausschließlich auf dem räumlich-korrelierten DEM-Fehler beruht. Ebenso wird der Phasenanteil der Masteratmosphäre und des Orbitfehlers (AOE) mitgeschätzt.
- **Schritt 8 - Atmosphärische Filterung:** Filterung um das von atmosphärischen Störungen herrührende Rauschen zu minimieren.

Als Ergebnis der PSI-Auswertung mit dem STaMPS-Paket lassen sich letztendlich mit Hilfe von Export-Skripten verschiedene Datensätze für die detektierten PS-Punkte extrahieren, wobei für jeden PS-Punkt folgende Attribute standardmäßig bereitgestellt werden:

- ID des PS-Punktes
- Koordinaten (Länge, Breite [EPSG 4326])
- Kohärenz des PS-Punktes
- mittlere Bewegungsrate in Blickrichtung (Line of Sight - LOS) + Standardabweichung (ermittelt durch lineare Regression über die Zeitreihen der relativen Verschiebungen des kompletten Analysezeitraums) in [mm/a]
- Digitales Höhenmodell (DEM) + geschätzter Fehler des DEM
- geschätzte Atmosphärenkomponente und AOE bzgl. der Master-Aufnahme
- relative Verschiebung (Bodenbewegung) in Blickrichtung (Line of Sight - LOS) für jeden Zeitschritt (Zeitreihe) in [mm] bezüglich eines gegebenen Bezugspunktes in Zeit und Raum. Der erste Aufnahmezeitpunkt stellt i. d. R. die Zeitreferenz dar und die räumliche Referenz wird durch einen bekannten Punkt außerhalb des Bereiches mit signifikanten Bewegungen definiert. Bei der Verwendung dieser relativen Verschiebungen in weiterführenden Analysen ist zu berücksichtigen, dass diese i. d. R. sehr gut die Trends in der Bewegung widerspiegeln, jedoch verfahrensbedingt nicht frei von Fehlern, Rauschen und saisonalen Schwankungen sind.

Bodenbewegungen sind zeitlich variierende dreidimensionale Verformungen der Erdoberfläche. Mit der Radarinterferometrie können jedoch zunächst nur Bewegungen in Blickrichtung des Sensors (Line of Sight - LOS) bestimmt werden. Um dreidimensionalen Bodenbewegungen zu erhalten, müssten drei richtungsverschieden aufgenommene und sich räumlich und zeitlich überlappende Radardatensätze vorliegen [10]. Da jedoch alle verfügbaren Radarsensoren näherungsweise nur eine Nord-Süd (aufsteigend/ascending) bzw. Süd-Nord (absteigend/descending) Flugrichtung aufweisen, verlaufen die Blickrichtungen (rechtsblickend mit ca. 90° zur Flugrichtung/Azimut) entweder von Westen nach Osten (aufsteigend/ascending) oder von Osten nach Westen (absteigend/descending). Dies hat zur Folge, dass mittels der aktuell verfügbaren Radardaten (wie z. B. Sentinel-1) nur die Ableitung von Höhenänderungen und Bewegungen in Ost-West Richtung möglich ist. Während die Bestimmung der horizontalen Bewegungskomponente in Ost-West Richtung nur durch die Kombination von Auswertungen der Radardaten eines auf- und absteigenden Orbits möglich ist, kann die Höhenänderung unter der Annahme, dass keine horizontalen Verschiebungen aufgetreten sind, auch aus der Bewegung in Blickrichtung (Line of Sight - LOS) ermittelt werden. Jedoch kann es dadurch in Gebieten mit auftretenden Horizontalbewegungen zu Fehlinterpretationen der Höhenänderungen kommen [11]. Daher ist die Auswertung eines auf- und absteigenden Orbits und anschließende Kombination der Ergebnisse grundsätzlich zu favorisieren.

4 PSI-Auswertung im Oelsnitzer Revier

4.1 Datengrundlage und Definition des Projektgebiets

Die Datengrundlage der nachfolgenden Auswertungen bildeten Radardaten aus dem Copernicus Satellitenprogramm Sentinel-1 a/b. Diese Daten sind über das Copernicus Services Data Hub Portal¹⁸ der European Space Agency (ESA) kostenfrei verfügbar. Das Oelsnitzer Revier wird grundsätzlich von drei Sentinel-1 Umlaufbahnen (Orbits) abgedeckt. Dies sind:

- relative orbit: 95 / descending / sub-swath: IW3
- relative orbit: 168 / descending / sub-swath: IW1
- relative orbit 44 / ascending / sub-swath: IW2

Für die erste Analyse aus [12] sowie für die vorliegenden Analysen wurden die Daten des absteigenden Orbits 168 genutzt. Auf eine gemeinsame Auswertung von auf- und absteigendem Orbit wurde zunächst verzichtet. Dies wird jedoch Bestandteil zukünftiger Aktivitäten im Untersuchungsgebiet sein. Die Tab. 1 zeigt einen Überblick der verfügbaren Sentinel-1 Aufnahmen (rel. Orbit 168/descending) pro Jahr. Für den Zeitraum 01/2015-09/2016 liegt mit ein paar Ausnahmen (6x Abstand: 24 Tage und 2x Abstand: 36 Tage) i. d. R. alle 12 Tage eine Aufnahme vor. Für den restlichen Zeitraum 09/2016-12/2018 liegt der zeitliche Abstand zwischen 2 Aufnahmen mit ein paar Ausnahmen (6x Abstand: 12 Tage und 2x Abstand 30 Tage) i. d. R. bei 6 Tagen. Diese höhere Datendichte ab 09/2016 hängt mit dem Start des operationellen Betriebes des zweiten Copernicus Sentinel-1 Radarsatelliten (1B) im Jahr 2016 zusammen.

Tab. 1: Überblick der verfügbaren Sentinel-1 Aufnahmen (rel. Orbit 168) im Zeitraum 2015-2018

Jahr	2015	2016	2017	2018
Anzahl der Aufnahmen	23	32	55	57

Das Projektgebiet wurde im Vergleich zur ersten Analyse [12] etwas vergrößert, und wie folgt in den Konfigurationsdateien von *snap2stamps* definierte: AOI BBOX DEFINITION → LONMIN=12.60 LATMIN=50.60 / LONMAX=12.90 LATMAX=50.80. Damit ergibt sich ein zu überwachender Bereich von ca. 500 km² mit einer Ost-West Ausdehnung von ca. 25 km und Nord-Süd von ca. 20 km. Wobei der Bereich aktiver Bodenbewegungen in und um Oelsnitz/E. ca. ein Gebiet von 36 km² umfasst (mit ca. 6 km Ausdehnung in Ost-West bzw. Nord-Süd Richtung).

Die erste Aufnahme vom 09.01.2015 stellt die Zeitreferenz dar, d.h. es wurde definiert für die Analyse das bei $t = 0$ (09.01.2015) die Verformung an allen Punkten Null war. Die räumliche Referenz ist definiert durch einen Bereich im Nordwesten des Untersuchungsgebietes (bei Lichtenstein/Sachsen), in dem keine signifikanten Bodenbewegungen auftreten bzw. zu erwarten sind. Dieser Referenzbereich wird in der Software STaMPS durch die Angabe eines Punktes [L:12.625 B: 50.76] + Radius [125 m] als Programm-Parameter '*ref_centre_lonlat*' und '*ref_radius*' definiert.

¹⁸ ESA's Copernicus Services Data Hub portal - <https://cophub.copernicus.eu/dhus/>

4.2 Zielstellungen der aktuellen Untersuchungen

Aufgrund der Erfahrungen unserer ersten PSI-Analyse im Oelsnitzer Revier [12] für den 3 Jahreszeitraum 2015-2017 war eine Reduzierung der Prozessierungs- bzw. Berechnungszeiten von großer Bedeutung, da die Rechenzeit der ersten Auswertung (ca. 660 h) zeigte, dass vor allem die Vorverarbeitung von großen Aufnahmestapeln (>100 Aufnahmen) mit der Software SNAP sehr zeitaufwändig ist. Als eine mögliche Lösung erschien daher die Aufteilung der Daten in kleinere Unterstapel sinnvoll. Von M. Foumelis und J. M. Delgado Blasco wurde dieser Ansatz bereits verwendet [13] und in Form einer Python-Skriptsammlung und zugehörigen xml-Graphen (*snap2stamps*¹⁹) implementiert und veröffentlicht. Daher soll dieser Ansatz, hinsichtlich der Effizienz, mit dem Vorgehen aus unserer ersten Analyse verglichen werden.

Da seit der ersten PSI-Analyse inzwischen auch Daten für ein weiteres Jahr (2018) verfügbar wurden, sollten diese natürlich auch im Sinne eines kontinuierlichen Monitorings verwendet werden.

Die Ermittlung der optimalen Master-Aufnahme als Teil der Datenvorverarbeitung mit Hilfe des SNAP-Tools „Optimal InSAR Master Selection“ wie im vorherigen Kapitel beschrieben, warf die Frage auf, wie sensitiv bzw. robust die Analyseergebnisse hinsichtlich der Wahl der Master-Aufnahme sind, da für den Zeitraum 2015-2017 (3 Jahre) die Aufnahme vom 04.01.2017 und für den Zeitraum 2015-2018 (4 Jahre) die Aufnahme vom 21.06.2017 als optimale Masteraufnahme identifiziert wurde. Um den Einfluss der Master-Aufnahme besser beurteilen zu können, wurde entschieden die Analyse unabhängig für beide Master-Aufnahmen durchzuführen. Dabei gab es außer bei der Wahl der Masteraufnahme keine weiteren Unterschiede (z.B. bei Parametern, Daten o. ä.) zwischen den Analysen.

Aufgrund der zu erwartenden höheren Stabilität der Ergebnisse wird bei Verfügbarkeit neuer Daten i. d. R. empfohlen den kompletten Zeitraum, d. h. 2015-2018 (4 Jahre) gemeinsam neu auszuwerten. Um diesen Sachverhalt zu untersuchen und so mehr Vertrauen in die ermittelten Analyseergebnisse zu bekommen, soll darüber hinaus untersucht werden, ob bzw. inwieweit sich die Analyseergebnisse der Bodenbewegungen für sich überlappende Zeiträume unterscheiden. Hierfür wurden bezüglich beider Master-Aufnahmen jeweils der Zeitraum 2015-2017 (3 Jahre) und 2015-2018 (4 Jahre) vergleichbar ausgewertet.

Abschließend sollen dann noch einige Betrachtungen zur Ermittlung von Bewegungsraten (Trends) aus den zur Verfügung stehenden Bodenbewegungszeitreihen angestellt werden.

4.3 Ergebnisse

In den nachfolgenden Abschnitten sollen die Ergebnisse der Analysen hinsichtlich der definierten Zielstellungen dargestellt werden.

¹⁹ snap2stamps - <https://zenodo.org/record/1322353#.XKxdOKRCTmE>

4.3.1 Prozessierung- bzw. Berechnungszeiten

Unter Nutzung der im Paket *snap2stamps* bereitgestellten Skripte und Graphen konnte die Rechenzeit im Vergleich zur ersten Analyse um mehr als den Faktor 15 reduziert werden. Die Tab. 2 zeigt eine Gegenüberstellung der entsprechenden Berechnungszeiten für den bisherigen Ansatz aus [12] und dem neuen Ansatz unter Nutzung von *snap2stamps*. Der neue Ansatz (*snap2stamps*) bei dem für n -Aufnahmen n -Stapel, bestehend jeweils aus der Masteraufnahme und einer Slave-Aufnahme, generiert werden, stellt gegenüber dem bisherigen Vorgehen, d. h. ein Stapel mit alle verfügbaren Daten, einen deutlichen Fortschritt in der Anwendung dar.

Tab. 2: Vergleich der Rechenzeiten zw. verschiedenen Ansätzen in der Vorverarbeitung

Prozessierungsschritte	Bisheriger Ansatz mit einem großen Aufnahmestapeln	Snap2Stamps Ansatz mit n-Stapeln bestehend jeweils aus Master + 1 Slave Aufnahme
Vorverarbeitung in SNAP	ca. 665 h	ca. 40 h
PSI-Auswertung in STaMPS	ca. 1 h	ca. 1 h

4.3.2 Überblick der PSI-Analyseergebnisse

PSI-Analyse 2015-2018 - ehem. Steinkohlerevier Oelsnitz/E.

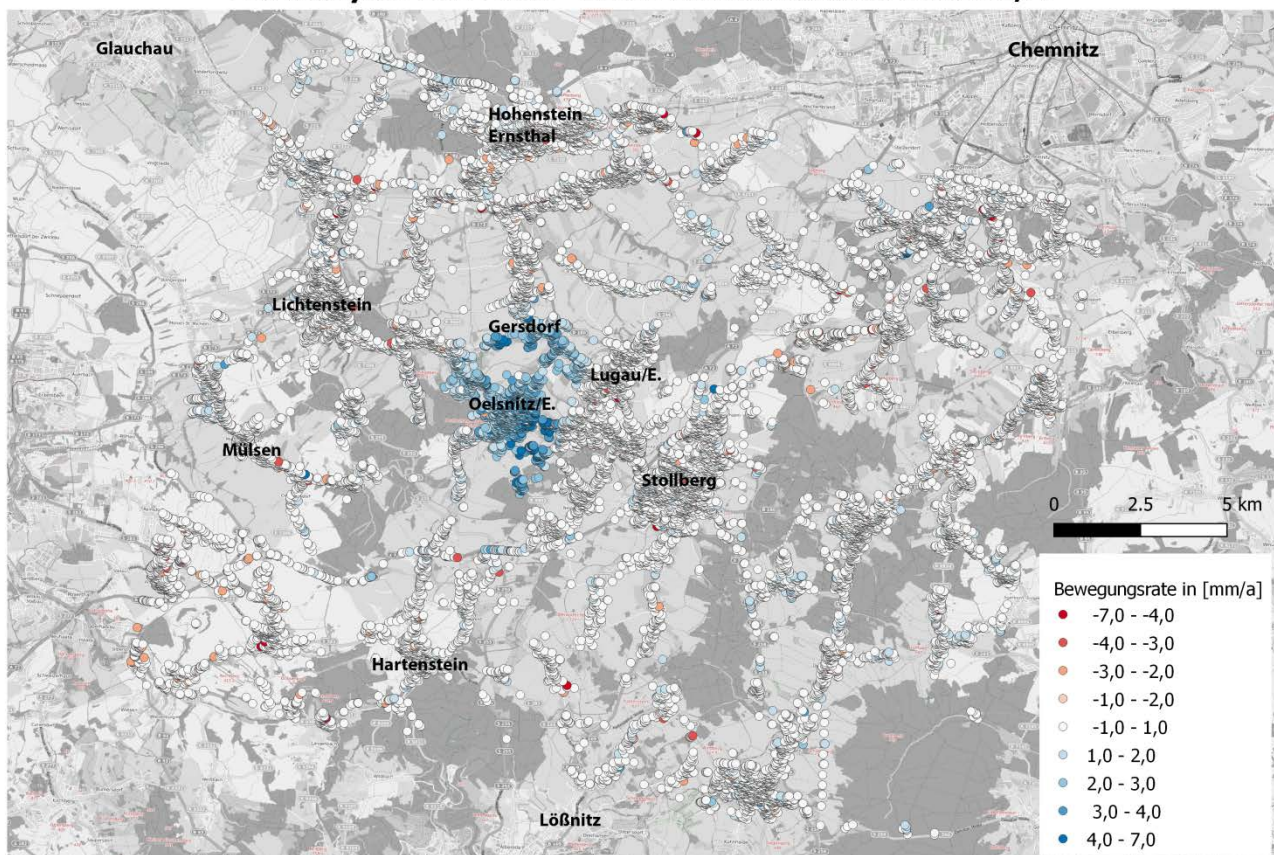


Abb. 14: PSI-Analyseergebnis für den Zeitraum 2015-2018 (Master: 21.06.2017)

Tab. 3: Überblick: Anzahl der PSI-Punkte je Analyse

Zeitraum	Master 2017-01-04	Master 2017-06-21
2015 - 2017	23841 Punkte	24417 Punkte
2015 - 2018	22123 Punkte	22652 Punkte

Betrachtet man die Anzahl der PSI-Punkte je Analyse (Tab. 3), so stellt man einen geringen Rückgang mit zunehmender Länge des analysierten Zeitraums fest. Dies war grundsätzlich zu erwarten, da mit länger werdenden Analysezeiträumen die Wahrscheinlichkeit zunimmt, dass grundsätzliche Veränderungen im Untersuchungsgebiet auftreten (z.B. bauliche Veränderungen), so dass weniger Punkte über einen längeren Zeitraum als stabile Rückstreuer in Erscheinung treten. Grundsätzlich weisen die Datensätze aller Analysen aber eine nahezu gleich räumliche Verteilung der PSI-Punkte im Untersuchungsgebiet auf. Die Abb. 14 zeigt am Beispiel der mittleren Bewegungsrate (Zeitraum: 2015-2018 Master-Aufnahme: 21.06.2017), die räumliche Ausdehnung der PSI-Punkte im Untersuchungsgebiet.

4.3.3 Vergleich der PSI-Analysen unterschiedlicher Masterszenen

Die Lokalisierungsgenauigkeit von PSI-Punktwolken wird im Geokodierungsprozess durch verschiedene Faktoren beeinträchtigt, was Probleme bei der Interpretation der Verformungsergebnisse verursachen und auch den Vergleich von PSI-Punkten unabhängiger Analysen bzw. von PSI-Punkten mit Daten anderer Sensoren erschwert. Während relative Verschiebungen in Blickrichtung (LOS) mit einer Genauigkeit im Millimeterbereich geschätzt werden können, liegt die Positionierungsgenauigkeit gewöhnlich in der Größenordnung von Dezimetern oder sogar Metern. In Schubert et al. 2015 [14] wurde die absolute Positionsgenauigkeit aus Aufnahmen von Sentinel-1 in Azimut und Range Richtung im besten Fall in der Größenordnung von mehreren Dezimetern ermittelt. Radarmessungen werden durch verschiedene Komponenten beeinflusst die sich auf die Positionsschätzung auswirken, wobei atmosphärische Einflüsse, Erdgezeiten, Tektonik und Timing-Fehler (Azimutverschiebung) die dominierenden Faktoren darstellen [15], welche Fehler in der Größenordnung von Zentimetern bis Metern verursachen können. Daher weisen auch die Ergebnisse unserer verschiedenen PSI-Analysen nicht exakt die gleiche Positionierung auf. Für den Vergleich der beiden Analysen (2015-2018) hinsichtlich der Nutzung verschiedener Master-Aufnahmen wurde daher zunächst zu jedem PSI-Punkt der Analyse (Master: 2017-01-04) der nächste Nachbar in der Analyse (Master: 2017-06-21) bestimmt. Anschließend erfolgte die Analyse der insgesamt 13478 PSI-Punktpaare, welche einen Abstand < 5 m zum nächsten Nachbar zeigten. Dabei wurden die Kohärenz, die mittlere Bewegungsrate, die Standardabweichung der mittleren Bewegungsrate sowie die Distanzen zwischen den identifizierten Punktpaaren berücksichtigt.

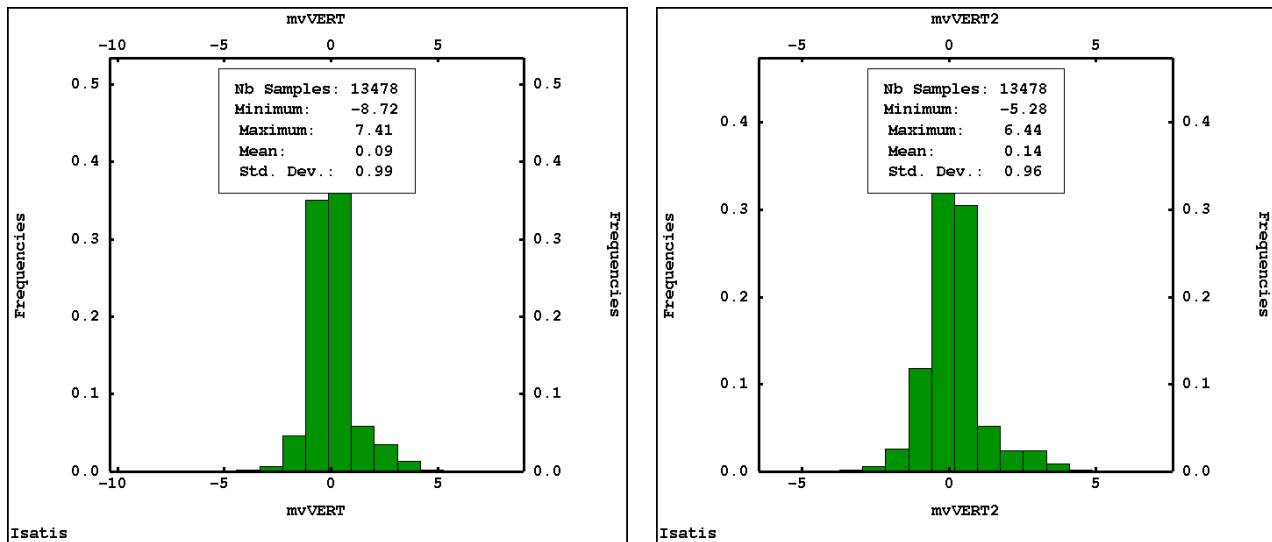


Abb. 15: Vergleich der Statistik der mittleren Bewegungsrate im Zeitraum 2015-2018 in [mm/a]
Master: 2017-01-04 (links) / Master: 2017-06-21 (rechts)

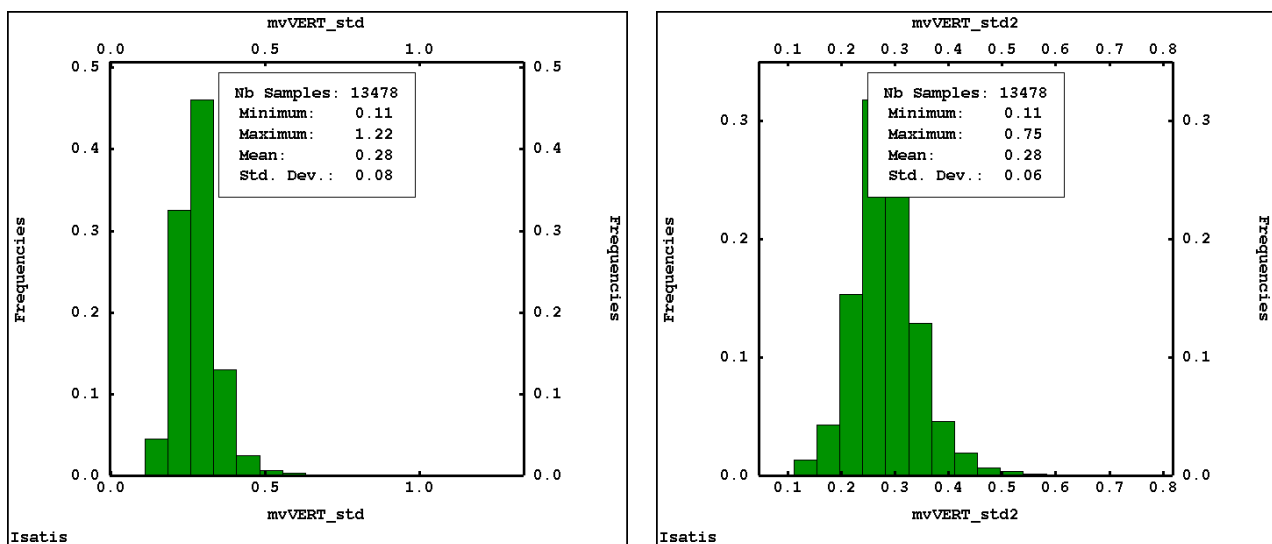


Abb. 16: Vergleich der Standardabweichung der Bewegungsrate im Zeitraum 2015-2018 in [mm/a]
Master: 2017-01-04 (links) / Master: 2017-06-21 (rechts)

Ein Vergleich der Statistik der abgeleiteten mittleren Bodenbewegungsrate für den Zeitraum 2015-2018 (Abb. 15) zeigt zunächst nur geringfügige Abweichungen für die zwei Analysen unter Nutzung verschiedener Master-Aufnahmen. Betrachtet man darüber hinaus jedoch noch die entsprechenden Standardabweichungen der abgeleiteten Bewegungsrate (Abb. 16), dann zeigt sich, dass die Abweichungen im Mittel zwar relativ gleich sind, jedoch höhere Extremwerte und eine größere Variabilität bei Nutzung der Master-Aufnahme vom 04.01.2017 auftreten. Damit zeigt sich, dass eine nicht ‚optimal‘ gewählte Masteraufnahme negativen Einfluss auf die resultierenden PSI-Zeitreihen hat, so dass diese im Vergleich mehr Störeinflüsse enthalten. Bestätigt wird dies auch durch die Betrachtung der ermittelten Kohärenzen beider Analysen (Tab. 4). Erwartungsgemäß sind die Kohärenzen für die als ‚optimal‘ identifizierte Masteraufnahme vom 21.06.2017 besser als im Falle der alternativ gewählten Masteraufnahme vom 04.01.2017, da die Auswahl der optimalen

Masteraufnahme auf einer Maximierung der geschätzten, erwarteten Kohärenz beruht (s. Kapitel 2 - Ermittlung einer optimalen Master-Aufnahme).

Tab. 4: Vergleich der Statistik der resultierenden Kohärenz der beiden PSI-Analysen

Statistik der Kohärenz	Master 2017-01-04	Master 2017-06-21
Minimum / Maximum	0.30 / 1.00	0.33 / 1.00
Mittelwert	0.88	0.90
Standardabweichung	0.10	0.08
Quantil Q25 / Q50 / Q75	0.83 / 0.90 / 0.95	0.86 / 0.92 / 0.96

Die trotz der etwas höheren Fehlereinflüsse in den PSI-Zeitreihen vergleichbaren Bewegungsraten spiegeln sich auch in der Statistik der Differenzen zwischen den abgeleiteten Bewegungsraten pro Jahr wieder. Diese liegen im Mittel annähernd bei null und zeigen ausgenommen einiger Ausreißer i. d. R. Differenzen im Bereich von ± 1 mm/a (Abb. 17 - links). Eine geostatistische Analyse der Differenzen mit Hilfe einer Variogramm-Analyse (Abb. 17 - rechts) zeigte darüber hinaus, dass die Differenzen der Bewegungsraten keine räumliche Struktur besitzen, sondern in ihrem räumlichen Auftreten zufällig sind. Das bedeutet, dass beide Masteraufnahmen zunächst grundsätzlich als geeignet erscheinen, auch wenn die Aufnahme vom 21.06.2017, aufgrund der vorangegangenen Ergebnisse, zu favorisieren ist. Hätten sich im experimentellen Variogramm nicht nur eine Nugget-Varianz, sondern eine räumliche Abhängigkeit der Differenzen gezeigt, dann wäre dies ein Indiz dafür, dass eine der beiden Masteraufnahme lokale atmosphärische Anomalien enthält.

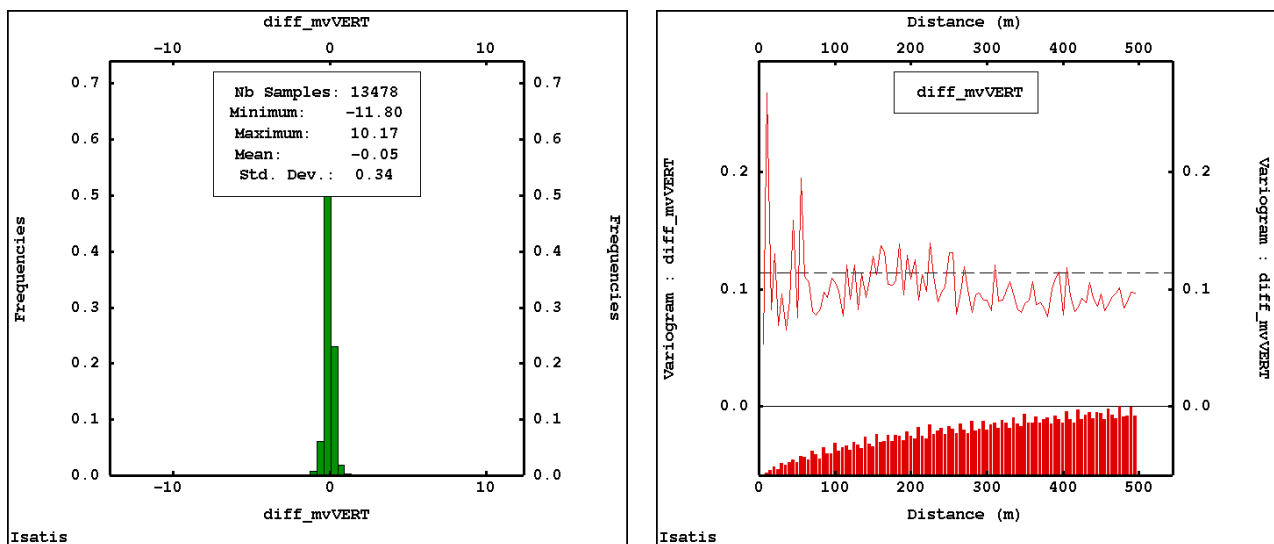


Abb. 17: Histogramm für Differenzen der mittleren Bewegungsrate (links) und experimentelles Variogramm für diese Differenzen (rechts)

Die Abb. 18 - links zeigt eine Analyse der Distanzen zwischen den ausgewerteten PSI-Punktpaaren (nächste Nachbarn) aus den beiden Analysen. Die Unterschiede in der ermittelten räumlichen Lage der PSI Punkte liegt demnach im Mittel bei ca. 2 m., was zu den Aussagen aus [15] bezüglich der Größenordnung auftretender Fehler aufgrund atmosphärischer Einflüsse passt. Eine Analyse der Abhängigkeit der ermittelten Differenzen der Bewegungsraten von der Distanz der PSI-Punktpaare

(Abb. 18 - links) zeigte, dass diese voneinander unabhängig sind. Da für uns vor allem die Modellierung der großräumigen Bodenbewegungsstrukturen von Interesse ist, sind die Fehler in der Positionsgenauigkeit der PSI-Ergebnisse zunächst nicht entscheidend für die Modellierung des Untersuchungsgebiets. Denn eine nachfolgende Modellierung der Bodenbewegungen geschieht i. d. R. auf regelmäßigen Gittern, mit Gitterzellen in der Größenordnung von 25 – 250 m, so dass der Einfluss der Positionsgenauigkeit vernachlässigbar ist.

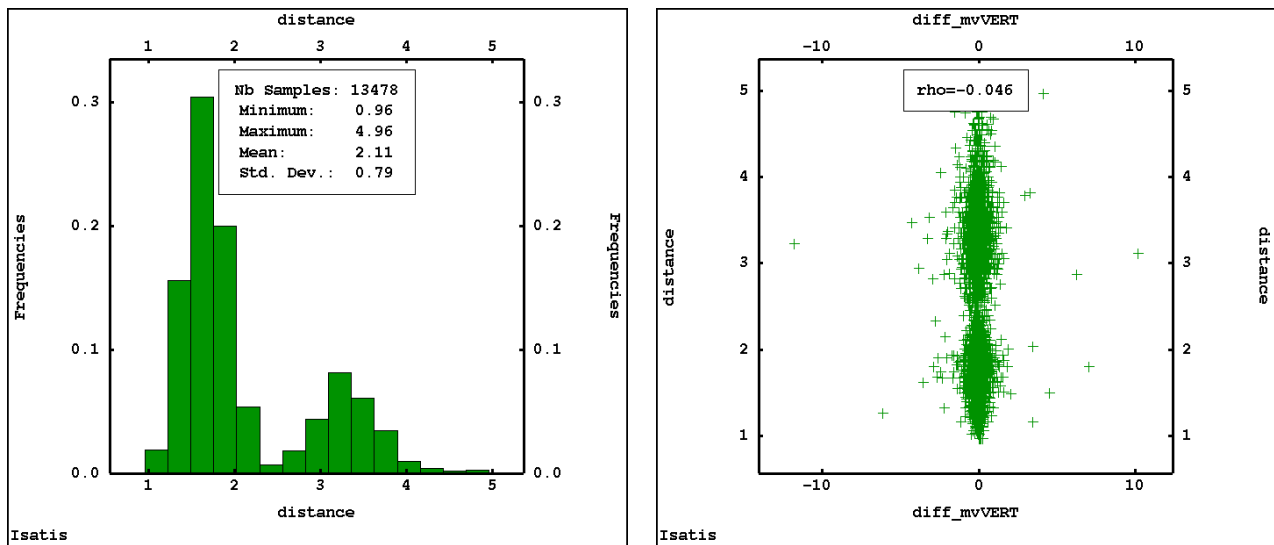


Abb. 18: Statistik der Distanzen zwischen den PSI-Punktpaaren (links) und Zusammenhang zwischen diesen Distanzen und den Differenzen in der Bewegungsrate (rechts)

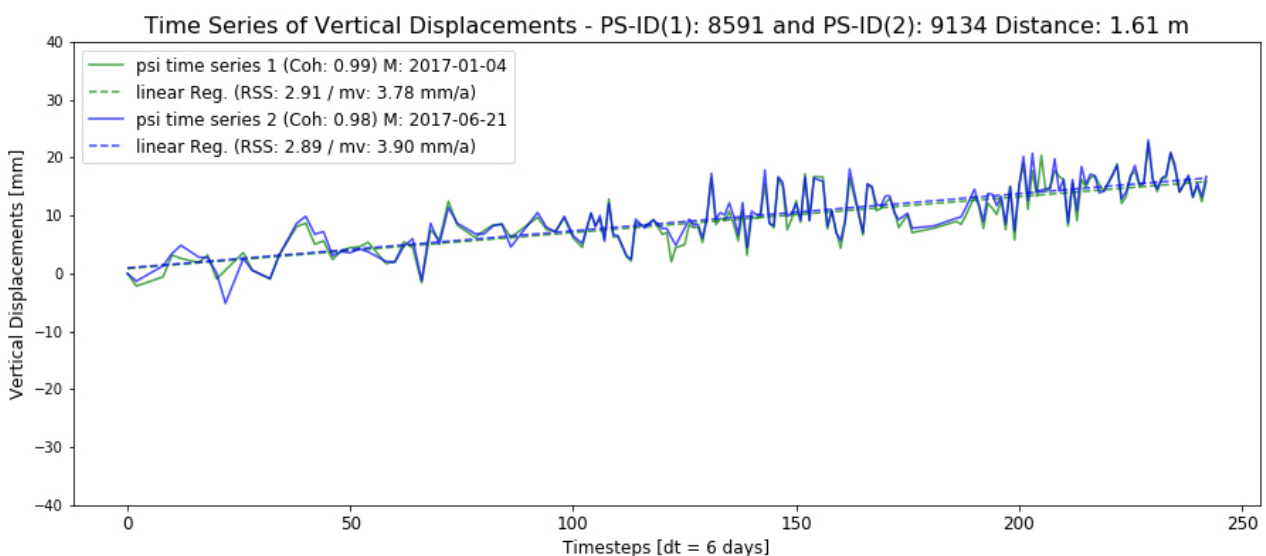


Abb. 19: Beispiele für Zeitreihen der vertikalen Bodenbewegung mit den geschätzten mittleren Bewegungsraten aus der PSI-Analyse 2015-2018 für einen PSI-Punkt im Süd-Osten der Stadt Oelsnitz/E.

In Abb. 19 sind abschließend beispielhaft die PSI-Zeitserien sowie die abgeleiteten mittleren Bewegungsraten für ein PSI-Punktpaar im Süd-Osten der Stadt Oelsnitz/E. dargestellt.

4.3.4 Vergleich der PSI-Analysen unterschiedlicher Betrachtungszeiträume

Für den Vergleich der PSI-Analyseergebnisse unter Berücksichtigung unterschiedlich langer Betrachtungszeiträume wurden die 3-Jahres (2015-2017) und 4-Jahres (2015-2018) Analysen herangezogen und analog zum vorherigen Kapitel deren PSI-Punktpaare analysiert. Dabei ist zunächst festzustellen, dass die auftretenden Distanzen zwischen den 16888 PSI-Punktpaaren (nächste Nachbarn) deutlich geringer sind, als bei der Verwendung unterschiedlicher Master-Aufnahmen. Die Unterschiede in der ermittelten räumlichen Lage der PSI Punkte liegt demnach im Mittel bei ca. 0,38 m, wobei ein Großteil der PSI-Punktpaare (15336 Punktpaare) eine Distanz $< 0,01$ m aufweist. Das bestätigt nochmal den im vorherigen Abschnitt betrachteten atmosphärischen Einfluss auf die Positionierungsgenauigkeit der PSI-Punkte. Die Abb. 20 zeigt beispielhaft die PSI-Zeitreihen sowie die abgeleiteten mittleren Bewegungsraten für ein PSI-Punktpaar südlich der Stadt Oelsnitz.

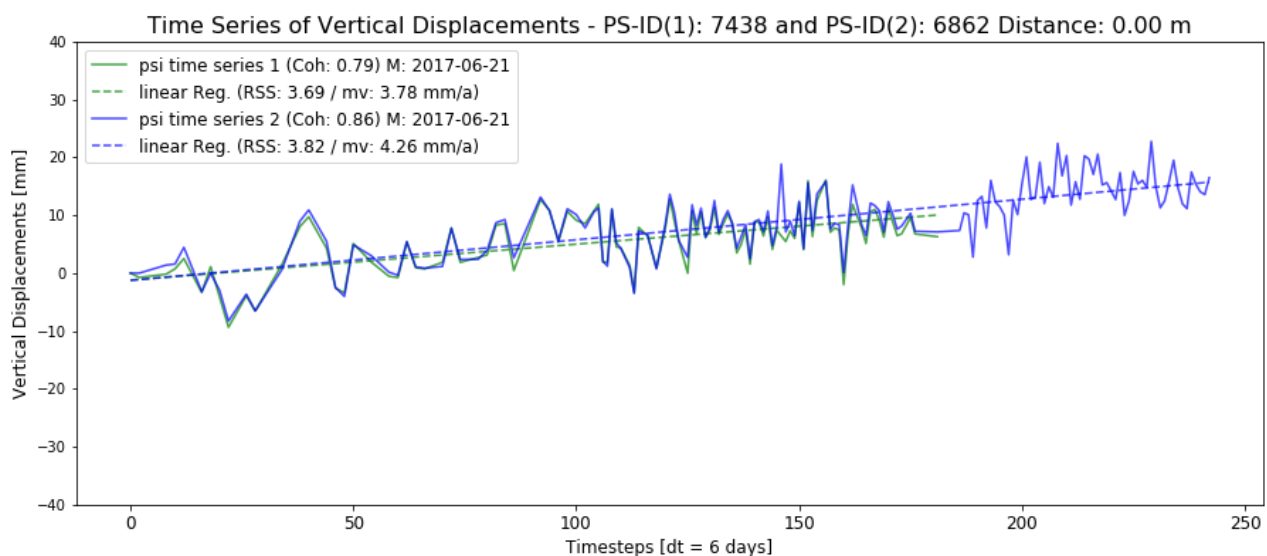


Abb. 20: Beispiel für Zeitreihen der vertikalen Bodenbewegung (Analyse 2015-2017 und 2015-2018 mit Master 2017-06-21) mit den jeweils geschätzten mittleren Bewegungsraten für einen PSI-Punkt südlich der Stadt Oelsnitz/E.

Der Vergleich der Kohärenzen beider Analysen, zeigte keine Unterschiede in der statistischen Verteilung der Kohärenzwerte. Die Analyse der Standardabweichungen der geschätzten Bewegungsrate beider Zeiträume (2015-2017 und 2015-2018) bestätigt jedoch die Erwartung, dass die Stabilität der Ergebnisse durch Betrachtung längerer Zeiträume zunimmt. Wie in Abb. zu sehen ist, zeigen sich für den längeren 4-Jahreszeitraum geringere Abweichungen in den PSI-Zeitreihen vom modellierten linearen Trend.

Der Vergleich der Bodenbewegungsraten zeigt erwartungsgemäß Unterschiede, aufgrund der unterschiedlichen Datenlage. Diese Unterschiede sind Ausdruck eines sich zeitlich verändernden Bewegungsverhalten im Untersuchungsgebiet und soll an dieser Stelle zunächst nicht weiter betrachtet werden.

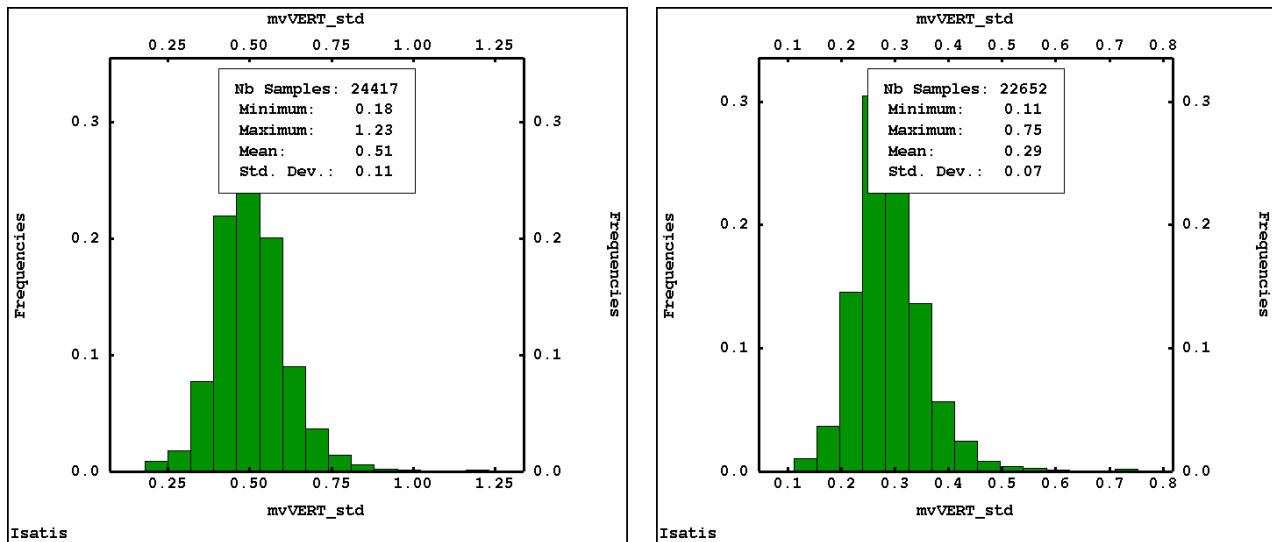


Abb. 21: Vergleich der Standardabweichungen der geschätzten Bewegungsrate in [mm/a] für Master-Aufnahme 2017-06-21 im Zeitraum 2015-2017 (links) / 2015-2018 (rechts)

4.3.5 Trendanalysen

Die PSI-Zeitreihen der relativen Bodenbewegungen setzen sich aus einer Trendkomponente sowie stochastischen Schwankungen zusammen. Letztere ergeben sich durch autoregressive Prozesse (Signalschwankungen, deren Ursachen zunächst unbekannt sind), systematische (und grobe) Messfehler (z. B. durch atmosphärische Störungen oder Phasenabwicklungsfehler) sowie Rauschen [11]. Die Trendkomponente wird im Zuge der PSI-Analyse mit der Software STaMPS zunächst nur durch lineare Regression bestimmt. Aus diesem so ermittelte lineare Bewegungstrend wird dann eine Bewegungsrate [mm/a] abgeleitet. Die Annahme eines linearen Bewegungsverhaltens ist für einen Großteil der PSI-Punkte im Untersuchungsgebiet (Oelsnitzer Revier) durchaus geeignete. Abb. 22 zeigt exemplarisch einen solchen PSI-Punkt westlich der Stadt Oelsnitz/E. in der Nähe der Deutschschachthalde. Jedoch kann auch ein nicht-lineares Verhalten charakteristisch für Bodenbewegungsprozesse sein. In diesen Fällen (Abb. 23 und Abb. 24) wird deutlich dass die Annahme einer linearen Bewegung die Dynamik der Bodenbewegungen nicht realistisch wiedergibt. Im Fall der Abb. 23 handelt es sich um einen PSI Punkt nördlich der Stadt Oelsnitz/E. (zwischen Hohndorf und Gersdorf), welcher ein Ausklingen der Hebungsbewegung im Jahr 2018 zeigt. In Abb. 24 hingegen handelt es sich um einen PSI Punkt südlich der Stadt Oelsnitz/E. in Waldesruh, welcher in einem Bereich liegt indem erwartungsgemäß der grubenwasserbedingte Hebungsprozess erst deutlich später (ab 2016) einsetzt. Für eine Raum-Zeitliche Modellierung der Bodenbewegungen sollten daher in diesen Fällen deterministische Trendmodelle höherer Ordnung oder eventuell auch statistische Moving-Window Ansätze herangezogen werden.

Neben dem linearen Trend (über 4 Jahre) sind in den Abb. - Abb. 25 immer auch der exponentielle gleitende Mittelwert (Fenstergröße 1 Jahr) sowie lineare Trends pro Jahr bestimmt wurden. Die Idee dabei war, diese abgeleiteten Jahrestrends für eine jahresweise Modellierung zu nutzen. Eine Analyse dieser jährlich ermittelten Bewegungsraten zeigte jedoch, dass diese aufgrund des zur kurzen Betrachtungszeitraums (1 Jahr) unrealistische und instabile Ergebnisse für die Bewegungsraten

ausweisen. Sehr deutlich wird dies in Abb. 25, wo die Jahrestrends die Situation vollkommen unrealistisch wiedergeben.

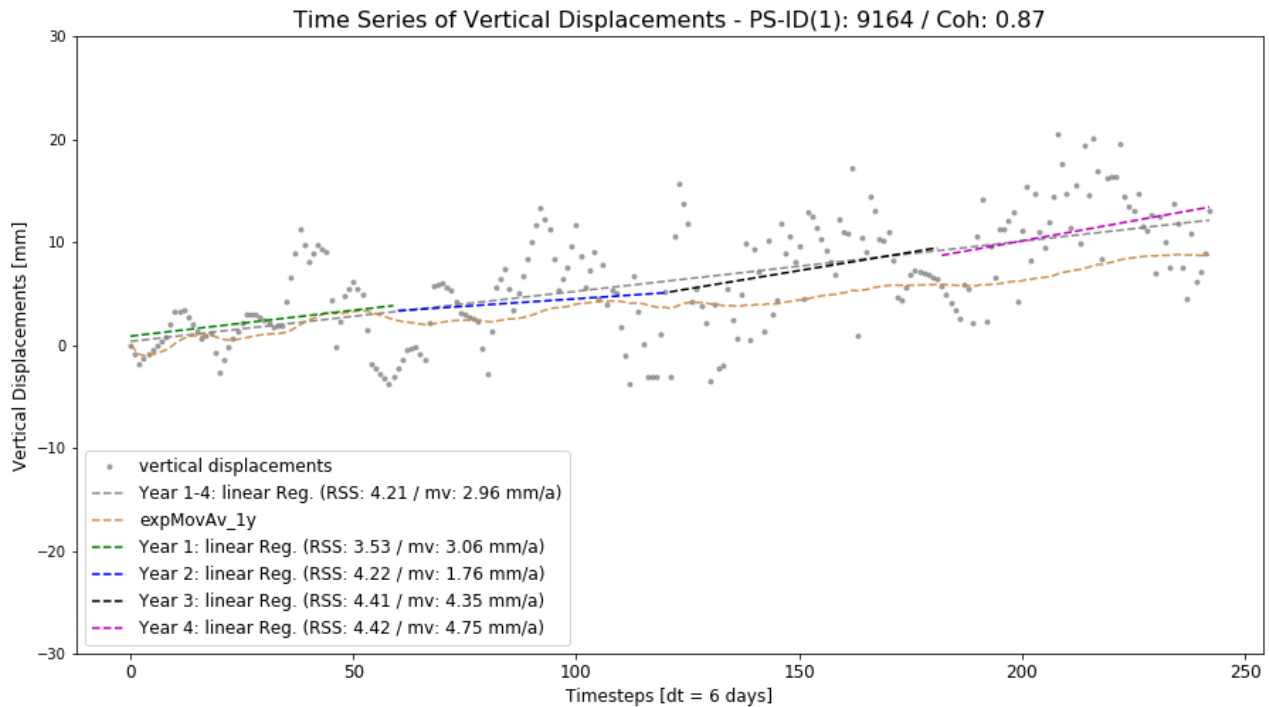


Abb. 22: Zeitreihe der vertikalen Verschiebung [mm] mit Gegenüberstellung von verschiedenen abgeleiteten Bewegungstrends (lineare Regression über 4 Jahre sowie separat für jedes Jahr und exponentieller gleitender Mittelwert mit Fenstergröße 1 Jahr) für eine PSI Punkt westlich der Stadt Oelsnitz/E. (nähe Deutschschachthalde)

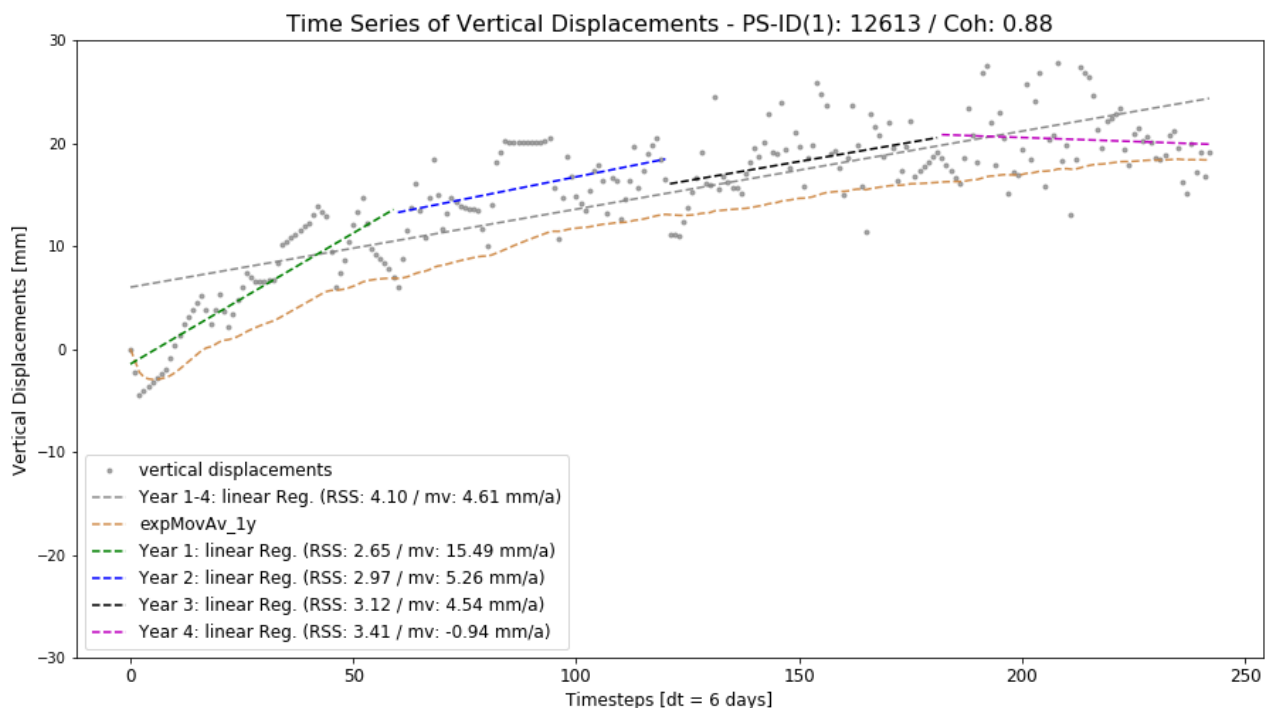


Abb. 23: Zeitreihe der vertikalen Verschiebung [mm] mit Gegenüberstellung von verschiedenen abgeleiteten Bewegungstrends (lineare Regression über 4 Jahre sowie separat für jedes Jahr und exponentieller gleitender Mittelwert mit Fenstergröße 1 Jahr) für eine PSI Punkt nördlich der Stadt Oelsnitz/E. (zwischen Hohndorf und Gersdorf)

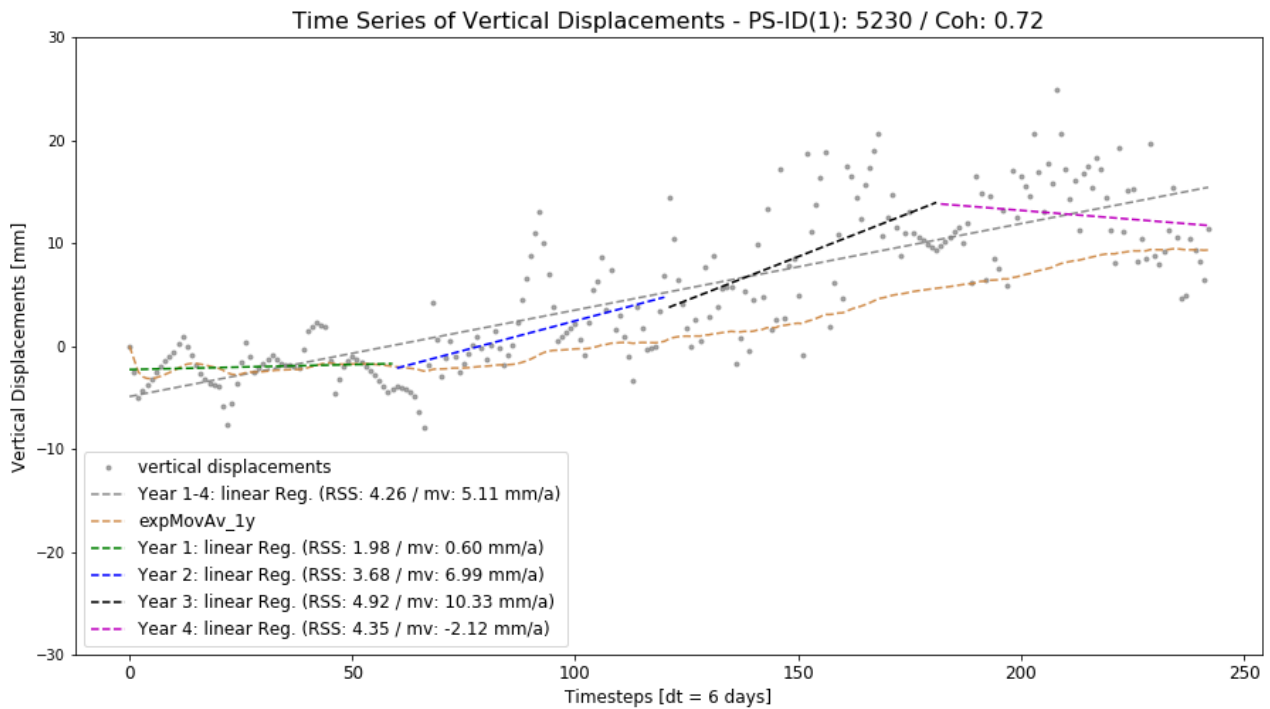


Abb. 24: Zeitreihe der vertikalen Verschiebung [mm] mit Gegenüberstellung von verschiedenen abgeleiteten Bewegungstrends (lineare Regression über 4 Jahre sowie separat für jedes Jahr und exponentieller gleitender Mittelwert mit Fenstergröße 1 Jahr) für eine PSI Punkt südlich der Stadt Oelsnitz/E. (in Waldesruh)

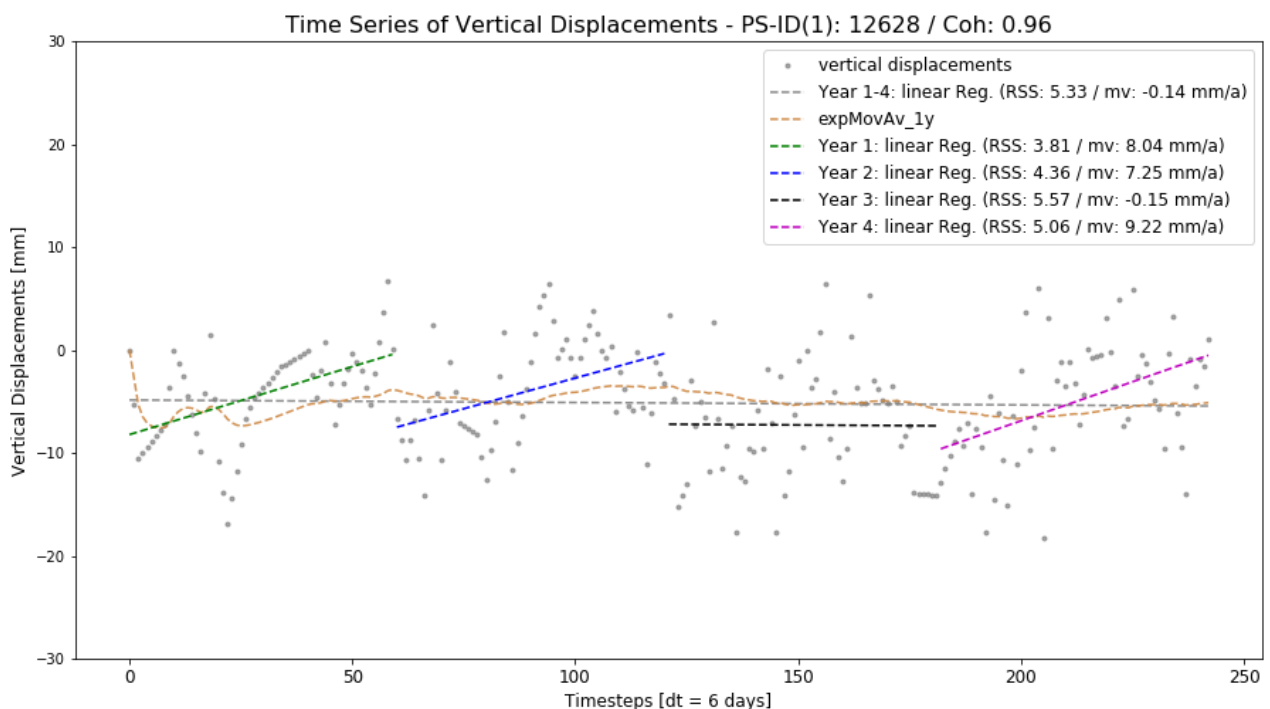


Abb. 25: Zeitreihe der vertikalen Verschiebung [mm] mit unrealistisch abgeschätzten jährlichen Bewegungsraten aufgrund zu kurzer Betrachtungszeiträume für einen PSI-Punkt (unbewegter Bereich) am östlichen Rand des Untersuchungsgebiets

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Mit den aktuellen Analysen zu den radarinterferometrisch detektierten vertikalen Bodenbewegungen in Folge des Grubenwasseranstiegs im ehemaligen Steinkohlenrevier Oelsnitz/E. wurde verschiedene Fragestellungen adressiert, welche sich aus der ersten PSI-Analyse (2015-2017) [12] ergaben. So konnte beispielsweise durch die Nutzung eines neuen Ansatzes (*snap2stamps*), für die Prozessierung der Daten mit der Software SNAP, die Rechenzeit deutlich verringert werden. Des Weiteren konnte nachvollzogen werden, wie die Stabilität einer PSI-Zeitreihen mit zunehmenden Betrachtungszeitraum zunimmt. Der Versuch der Ableitung von jährlichen Bewegungstrends zeigte, dass aus zu kurz gewählte Betrachtungszeiträume unrealistische Ergebnisse resultieren. Der Vergleich der Analysen unter Nutzung verschiedener Master-Aufnahmen verdeutlichte nochmal die Bedeutung der Wahl einer geeigneten Aufnahme. Dabei stellt die Nutzung des in SNAP implementierten Tools zur Identifikation einer ‚optimalen‘ Aufnahme, auf der Grundlage der geschätzten erwarteten Kohärenz, ein brauchbares Werkzeug dar. Jedoch sollten darüber hinaus immer auch weitere Analysen zu möglichen systematischen Einflüssen der Masteraufnahme in Betracht gezogen werden.

Für das ehemalige Oelsnitzer Revier stellt die gemeinsame Auswertung von auf- und absteigendem Orbit den nächsten logischen Schritt zukünftiger Aktivitäten im Untersuchungsgebiet dar. Darüber hinaus liefert der Themenkomplex Raum-Zeitliche Modellierung von Bodenbewegungen auf der Basis radarinterferometrisch gewonnener Daten weiterer Forschungsbedarf.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Merrill I. Skolnik. Radar Handbook. McGraw-Hill Education; 3 edition (Feb.12, 2008), 1980.
- [2] Merrill I. Skolnik. Introduction to Radar Systems. McGraw-Hill Kogakusha Ltd., 2nd Edition, New York NY, 2008.
- [3] R. Hanssen. Radar interferometry - Data interpretation and error analysis. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht [u.a.], 2001.
- [4] A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca. Permanent scatterers in sar interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39(1):8–20, Jan 2001.
- [5] C. Werner, U. Wegmuller, T. Strozzi, and A. Wiesmann. Interferometric point target analysis for deformation mapping. In IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No.03CH37477), volume 7, pages 4362–4364 vol.7, July 2003.
- [6] M. Crosetto, O. Monserrat, M. Cuevas-González, N. Devanthéry, and B. Crippa. Persistent scatterer interferometry: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 115:78 – 89, 2016. Theme issue 'State-of-the-art in photogrammetry, remote sensing and spatial information science'.
- [7] A. Hooper, H. Zebker, P. Segall, and B. Kampes. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using insar persistent scatterers. 31:1–5, 12 2004.

- [8] A. Hooper. A multi-temporal insar method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophysical Research Letters*, 35(16).
- [9] A. Hooper and Howard A. Zebker. Phase unwrapping in three dimensions with application to insar time series. *J. Opt. Soc. Am. A*, 24(9):2737–2747, Sep 2007.
- [10] Yin, X.; Busch, W.: Nutzung der Sentinel-1 Aufnahmekonfigurationen zur Ableitung von Bodenbewegungskomponenten im Rahmen eines radarinterferometrischen Bodenbewegungsmonitorings. In: Busch, W. (Hrsg.): Tagungsband Geomonitoring 2018, 1. bis 2. März 2018 in Clausthal-Zellerfeld, S. 119 – 138
- [11] Busch, W.; Walter, D.; Coldewey, W.G.; Hejmanowski, R.: Bergwerk Lohberg/Osterfeld der RAG AG. Analyse von Senkungserscheinungen außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches. Gutachten im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg. Institut für Geotechnik und Markscheidewesen, TU Clausthal, Mai 2017, Clausthal-Zellerfeld
- [12] A. John, K.-H. Löbel, 2018: Copernicus-Satellitendaten für das Monitoring von vertikalen Bodenbewegungen durch Grubenwasseranstieg im ehemaligen Steinkohlerevier Oelsnitz/Erzgebirge 18. Altbergbaukolloquium, Wieliczka 2018; Tagungsband - Wagner Digitaldruck und Medien GmbH, S. 101-119, ISBN 978-3-938390-22-1
- [13] M. Fomelis, J. M. Delgado Blasco, Y.-L. Desnos, M. Engdahl, D. Fernandez, L. Veci, J. Lu and C. Wong. "ESA SNAP - StaMPS Integrated processing for Sentinel-1 Persistent Scatterer Interferometry". IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS 2018.
- [14] A. Schubert A, D. Small, N. Miranda, D. Geudtner, E. Meier; Sentinel-1A product geolocation accuracy: commissioning phase results. *Remote Sensing* (7): 9431–9449. doi:10.3390/rs70709431. ISSN 2072-4292 (2015)
- [15] Dheenathayalan, P., Small, D., Schubert, A. et al.; High-precision positioning of radar scatterers, *Journal of Geodesy* (2016) Vol. 90 Issue 5: p. 403-422 <https://doi.org/10.1007/s00190-015-0883-4>
- [16] K.-H. Löbel, S. Döhner: Bergbaubedingte Senkungen und Hebungen in Oelsnitz/E. in *Geoprofil* 13 (2010), ISSN 0863-2200, S. 55-68
- [17] K.-H. Löbel, N. Tamaskovics, M. Eckart, W. Busch: Vertikale Bodenbewegungen im Zusammenhang mit dem Grubenwasseranstieg im ehemaligen Steinkohlenrevier Oelsnitz/Erzgebirge. In Tagungsband 15. Altbergbau-Kolloquium 2015, 05. Bis 07. November 2015 in Leoben, S. 114-129